HAL
open science

Problèmes à long terme posés par la pollution

Gilles Boursier

To cite this version:

Gilles Boursier. Problèmes à long terme posés par la pollution. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1973. hal-01909995

HAL Id: hal-01909995

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01909995v1

Submitted on 31 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

37

Consultation sur place

problèmes à long terme posés par la pollution

Dossier long I. S. Promo X 1967

[37]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES
Bibliothèque
N° IE 1

Juin 1973

Gilles Boursier

problèmes à long terme posés par la pollution

par Gilles Boursier

[37]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES
Bibliothèque
N° IE1

Dossier Long Ingenieur Elève Promo X 1967

S O M M A I R E

INTRODUCTION 1

Méthodes retenues, difficultés rencontrées 3

I - POLLUTION ATMOSPHERIQUE 8

1. Différents polluants 10

1.1. CO 10

1.2. SO_2 11

1.3. Oxydes d'azote 14

1.4. Poussières 15

1.5. Divers 17

2. Phénomènes régionaux 18

3. Phénomènes planétaires 22

II - POLLUTION AQUATIQUE 29

1. Différents polluants 31

1.1. Hydrocarbures 31

1.2. Détergents 34

1.3. Métaux lourds 36

1.4. Biocides 40

1.5. Divers 42

2. Eutrophisation 44

III - PROBLEMES GLOBAUX 50

1. Transport automobile 50

2. Energie électrique 57

CONCLUSION 64

Je voudrais ici remercier les personnes dont la compétence en matière de pollution m'a été d'une grande aide pour réaliser cette étude.

Mention particulière doit être faite de Monsieur J. SYROTA, adjoint au chef du service de l'environnement industriel (Ministère de l'Environnement), qui a su diriger mon effort sans imposer de contrainte au développement de mon travail.

Les personnalités dont les noms suivent voudront bien recevoir l'expression de ma gratitude pour leur contribution à ce rapport :

MM.	AUBERT	du C.E.R.B.O.M.
	BAPSERES	de la Société E L F
	BENARIE	de l'I.R.C.H.A.
	CHOVIN	du Laboratoire municipal de la Préfecture de police
	FACY	de la Météorologie nationale
	FESTY	du Laboratoire d'hygiène de Paris
	GAC	de la Faculté de pharmacie de Paris
	LARRÉ	du S.P.E.P.E.
	LAURENT	du Laboratoire d'hydrobiologie lacustre
	LOUIT	du Service de l'environnement industriel
	LYS	du S.P.E.P.E.
	NAUDINAT	de la Compagnie du chlore
	PARENTEAU	du Service de l'environnement industriel
	ROUSSEL	de l'I.N.S.E.R.M.
	SENECHAUT	de l'E.D.F.

INTRODUCTION

L'existence de la pollution, qui peut provenir aussi bien, comme nous le verrons, de l'activité humaine que de sources naturelles, pose à long terme un certain nombre de problèmes.

Tout d'abord, pendant une grande durée de leur vie, ou même pendant plusieurs générations, les organismes vivants peuvent être en contact avec certaines substances, dont les effets sont susceptibles de différer notablement de leurs actions immédiates, de façon difficilement prévisible ; ainsi dans certains cas l'accumulation au sein d'organismes, de polluants contenus en faible quantité par le milieu extérieur, conduit à accentuer considérablement les effets instantanés de ceux-ci ; d'autres fois l'adaptation au milieu rend des êtres vivants insensibles à des corps qui leur étaient primitivement nocifs. Ceci soulève donc la question de savoir comment réagira à long terme l'écologie dans son ensemble, à l'introduction de nouvelles substances, qu'elles soient ou non polluantes, au sens des effets immédiats. Les méthodes d'expérimentation susceptibles de répondre à cette question sont malheureusement longues et coûteuses ; elles ne pourraient de toute façon le faire que très partiellement, car leur efficacité est doûteuse ; enfin, les études systématiques menées dans cette direction ont débuté très récemment et ne permettent guère encore de tirer de conclusions. Aussi nous contenterons-nous d'examiner rapidement ces méthodes et leurs défauts, pour approfondir plutôt le point suivant.

La croissance de l'économie, et en particulier de l'industrie, a pour conséquence l'augmentation potentielle des nuisances. Aussi semble-t-il particulièrement intéressant d'évaluer leur accroissement, en extrapolant sur les bases de l'expansion actuelle, l'activité humaine. Parallèlement, doivent être définies, toujours en partant de nos connaissances actuelles, les limites que la pollution ne doit pas dépasser pour être acceptable.

La comparaison entre niveau de pollution prévisible et niveau supportable, permettra alors de mettre en relief les points qui risquent de poser des problèmes à long terme. De l'étude plus précise de ces derniers, compte tenu des améliorations potentielles des procédés technologiques, et des substitutions envisageables des moyens, viendra une meilleure connaissance de ce qu'il est possible d'obtenir sans gros danger pour la nature et l'homme.

Une telle étude a le défaut de cumuler les imperfections de tout travail sur la pollution, avec les vices de la prospective. La nouveauté de la matière mise seulement récemment en lumière, apporte aussi des inconvénients de deux types. D'une part, seul un faible volume de recherches par rapport à celles qui pourraient être lancées a été mené à terme, ce qui augmente

les risques d'erreurs ; d'autre part le caractère de sujet à sensation rend la pollution difficilement manipulable, comme tous les domaines à la mode. Enfin, il va sans dire qu'une étude générale sur un sujet aussi vaste, comme celle-ci, excède de beaucoup les capacités et le temps d'une seule personne. Ce travail peut donc être seulement considéré comme une introduction au sujet.

Néanmoins, faire le point, même grossièrement, dans un domaine déterminé, par le travail de synthèse que cela impose, porte toujours ses fruits. Le lecteur devra bien sûr garder à l'esprit les limites de cette étude : il ne s'agit pas ici de prédire l'avenir, mais d'examiner ce que les contraintes imposées par la pollution laissent l'économie humaine libre de faire.

Dans cette optique, seules les limitations essentielles ont été prises en compte, c'est-à-dire celles qui mettent en cause la planète, l'écologie ou l'homme lui-même. L'impossibilité en tout état de cause, d'envisager les progrès technique et scientifique à venir, permet de considérer les résultats d'une telle étude comme une limite inférieure de ce que l'humanité pourra effectuer sans risque fondamental. Un but primordial, d'ailleurs, d'un travail comme celui-ci, serait de susciter le progrès, par la mise en évidence des points délicats au regard de la pollution.

METHODES RETENUES, DIFFICULTES RENCONTREES

Difficulté de la prospective

Les prévisions s'effectuent par nature en extrapolant des données connues. Ceci entraîne un risque d'erreur de triple origine.

1°) Des phénomènes scientifiques seront en toute probabilité découverts, qui viendront modifier notre connaissance du problème des nuisances. Ainsi des substances supposées jusque-là inoffensives pourront devenir des polluants dangereux ; des produits nouveaux rejetés dans l'environnement pourront créer des sujétions nouvelles.

2°) Le progrès technique peut, par de nouveaux procédés, supprimer toute une catégorie de nuisances, ou permettre l'élimination de produits polluants.

3°) Des changements qualitatifs se produiront inévitablement aussi bien dans les goûts de l'humanité que dans les moyens retenus pour satisfaire ses besoins. Ainsi l'extrapolation à long terme faite sur la base des années 1880-90, de l'industrie du fer à cheval, nécessitée par le besoin de transport de l'homme, aurait donné des résultats pour le moins surprenants en 1930.

S'il n'est pas possible de prédire ce qui arrivera, on peut par contre être sûr que des transformations radicales changeront le monde tel que nous le connaissons actuellement ; l'histoire est justement constituée d'une succession de tels événements. La nouveauté des nuisances comme sujet de recherches systématiques, n'a permis de mettre en évidence qu'une faible partie du problème. Aussi, au stade actuel, la prévision risque-t-elle, là plus qu'ailleurs, d'être rapidement contredite par des faits qu'un peu de temps supplémentaire suffira à faire venir au jour.

La pollution

Les notions de pollution et de nuisance recèlent une idée de jugement de valeur, que l'on porte, lorsque par exemple l'on classe une substance parmi les polluants ; ainsi s'attache à tout fait susceptible de figurer parmi les activités polluantes un caractère de dommage causé à la collectivité, à l'écologie, voire quelques fois à la planète. Pour cette raison, la définition simple qui consiste à considérer comme pollution toute modification fondamentale par l'homme de son environnement, nous a semblé devoir être écartée résolument. En effet, comme nous le verrons ultérieurement, la nature peut parfois mal faire, et mettre en danger ses propres

créations ; ainsi une ère glaciaire qui surviendrait maintenant pour des raisons analogues à celles des glaciations du passé, auxquelles il est difficile que l'humanité ait eu une part, ne saurait être considérée, bien que naturelle, comme propice. C'est alors, dans de tels cas, à l'homme, au contraire, de redresser dans la mesure de ses moyens, l'action des éléments.

Nous préférons pour notre part, considérer comme pollution tout ce qui, activité humaine ou action naturelle, va à l'encontre des buts que l'humanité s'est fixés. Ceci repousse sans doute le problème sur des bases beaucoup plus subjectives, mais c'est paradoxalement faire oeuvre d'objectivité. En effet définir de façon absolue ce qui est pollution revient en fait à choisir implicitement une finalité pour l'humanité ; dans le cas de la première définition citée, le but ainsi retenu consiste à modifier l'environnement le moins possible. Ne pas souligner l'arbitraire de ce choix, c'est vouloir donner à ses arguments la force de la logique et de l'impartialité, alors qu'ils n'en ont que l'apparence.

Prendre en considération la pollution équivaut donc, pour nous, à prendre devant tout fait, naturel ou artificiel, une attitude ; elle consiste à l'évaluer en fonction des normes qui découlent des fins que poursuit l'humanité. Pour cette raison une étude des nuisances ne peut se faire que point par point, en considérant chaque cas comme particulier.

Pour simplifier le problème, ainsi que nous l'avons noté dans l'introduction, nous ne prendrons en compte ici que les nuisances mettant en jeu l'existence de l'humanité. Ainsi seront négligées des questions comme le bruit, les odeurs ou la pollution esthétique, qui représentent des gênes souvent importantes.

Difficulté de toute étude sur la pollution

L' impact sur les organismes de la pollution est mis à jour par deux méthodes, qui se heurtent chacune à une difficulté.

1°) L'expérimentation directe sur l'homme est évidemment très limitée ; sur l'animal elle pose le problème de la transposition à l'homme des résultats obtenus. Ainsi chez le rat, espèce fréquemment utilisée pour les expériences, le système olfactif joue un rôle très important pour la survie de l'espèce, et est donc de ce fait beaucoup plus élaboré que chez l'homme. En conséquence, il est plus fragile, et donc plus sensible à la pollution atmosphérique. De façon similaire, à partir d'études in vitro où l'on étudie séparément l'action de chaque substance, il est difficile de conclure pour le milieu réel, où tout se produit en même temps. La transposition est toujours délicate et demande beaucoup de prudence.

2°) L'humanité est soumise quotidiennement à la pollution, et l'étude d'échantillons de population semble intéressante. Là se pose le problème de la mesure des réactions à la pollution. Il n'est possible de les atteindre qu'au travers de la mortalité, de la morbidité ou de l'absentéisme. Ces phénomènes extrêmes rendent difficilement compte du

caractère insidieux des nuisances, alors apparemment ressenties seulement par les personnes affaiblies, malades et vieillards. Relier l'effet à la cause est souvent difficile, lorsque plusieurs pollutions concourent à l'insalubrité générale, et que des actions extérieures peuvent modifier les faits mesurables. Par exemple l'absentéisme augmente autour des week-ends, dans certains pays, sans qu'interviennent des motifs d'ordre biologique.

De même, les mesures que l'on fait de la pollution ne correspondent parfois pas de façon satisfaisante, à ce que supportent les êtres vivants. Ainsi,en matière de pollution atmosphérique du milieu urbain, on mesure les teneurs qui règnent à l'extérieur ; les gens sont soumis, par contre, successivement à l'air renfermé par leur logement, parfois situé dans une banlieue éloignée, puis à l'air de leur lieu de travail, enfin à l'atmosphère du moyen de transport qu'ils utilisent. Des variations notables des quantités de polluants contenus peuvent affecter considérablement toute constatation tirée dans ces conditions. Paradoxalement, là où la pollution est la plus intense, dans les grandes capitales, ce qui facilite l'étude de ses effets, la population est la plus mobile et donc exposée à ce qu'on ne mesure pas.

A tout cela s'ajoute un facteur psychologique qui empêche souvent les résultats contraires à l'attente générale de se répandre aussi vite qu'ils le pourraient. En effet les conclusions négatives d'études, qui ne montrent aucune corrélation entre une pollution et un effet quelconque, sont d'une part moins publiées par leurs auteurs, d'autre part plus difficiles à publier.

Difficultés liées aux effets à long terme

Les difficultés expérimentales sont magnifiées dès lors qu'il s'agit de mettre en évidence un impact de la pollution à longue échéance. Les effets sensibles seulement après exposition de plusieurs générations en sont un bon exemple. On ne peut guère qu'utiliser l'expérimentation sur des animaux se reproduisant suffisamment vite pour accélérer les phénomènes biologiques. Nous avons vu plus haut les limites d'une telle méthode. Il n'a pas été possible en particulier de constater une adaptation génétique à un polluant, due à l'accoutumance. Un tel phénomène semble peu probable dans le cas d'une substance toxique. Ainsi l'homme a été très longtemps exposé à des teneurs élevées en monoxyde de carbone, jusqu'à ce que la cheminée se soit généralisée ; malgré cela, ce corps reste un polluant à l'heure actuelle, en des quantités plus faibles.

Nécessité de traiter chaque nuisance séparément

Il semblerait très séduisant de symboliser le phénomène pollution par un agrégat, comme il est possible d'en utiliser pour représenter convenablement, par exemple, l'activité industrielle. Ne pas avoir à ajouter des grandeurs de types différents, contraindrait à évaluer en termes de monnaie cette variable, donc à en prendre pour définition le coût total des effets de la pollution. Malheureusement, non seulement ces derniers, très

diffus, sont difficilement quantifiables, mais l'évaluation de leur coût ne présente guère de sens, comme le feront bien sentir les deux exemples suivants, que l'on pourrait multiplier sans peine :

- La pollution par le dioxyde de soufre SO_2 présente un caractère insidieux qui peut-être se traduit, en plus d'une gêne et de soins nécessaires, par un raccourcissement de la vie. Dans cette hypothèse, à supposer que l'on puisse mesurer statistiquement le nombre moyen d'années perdues, reste à comptabiliser le coût de ces dernières.

- Parmi les multiples substances nouvelles ou non, qui sont rejetées dans l'environnement, il se peut qu'une, particulière, détruise un maillon précis de la chaîne écologique marine, par exemple, dont le rôle dans la vie terrestre est multiple (régénération de l'oxygène, production d'aliments pour l'homme, etc...). Affecter une probabilité à une telle éventualité est parfaitement vain ; calculer le coût de la fin de l'écologie telle que nous la connaissons ne présente aucun sens.

De plus, à supposer que soit praticable l'obtention d'une grandeur représentant la pollution, l'inanité de son rapprochement des autres agrégats la rend totalement inutile. En effet, pour une même activité économique on peut très substantiellement, comme nous le verrons ultérieurement, diminuer la pollution par des actions spécifiques, peu coûteuses dans beaucoup de cas.

Ainsi s'impose encore une fois, une étude point par point, où chaque cas particulier sera examiné en fonction de ce que l'humanité peut raisonnablement supporter.

Plan retenu

Plusieurs plans sont possibles pour présenter une étude de ce type. Parmi ceux-ci, les suivants sont les plus naturels :

- *par type de polluant ;* celui-ci, systématique, offre l'avantage de n'oublier aucune nuisance,

- *par source polluante ;* il met en évidence les mesures pratiques susceptibles de réduire la pollution et permet de les signaler plus commodément,

- *par composante de l'environnement sensible à certaines pollutions ;* celui ci réalise la présentation systématique des effets et souligne les actions concomitantes des polluants capables, dans certains cas, de synergie (fort mal connues au demeurant).

Nous avons retenu ce dernier parce qu'il est le plus souvent employé par les spécialistes de la matière, en lui adjoignant une sous-décomposition par substance polluante. Ceci donne le moyen, lorsqu'une source rejette seulement un polluant dans l'environnement, d'examiner les procédés permettant la réduction de l'émission polluante et leurs implications

économiques. Par contre, lorsque plusieurs substances polluantes sont à mettre au compte de la même source, il n'est pas possible, avec cette présentation, d'étudier de façon aisée les conséquences qu'aurait sur l'économie une diminution des rejets. Aussi avons-nous traité de ce point de vue, dans une partie ultérieure, le cas de deux sources multiples de pollution, particulièrement importantes dans le contexte actuel de l'activité humaine :

- *la production d'électricité,*

- *le transport automobile.*

Ce faire offre les avantages :

- de regarder séparément le cas particulier qu'est l'effet sur chaque composante de l'environnement de chaque polluant,

- d'évaluer l'importance respective de chaque pollution,

- de porter un jugement sur la source émettrice et sur l'attitude qu'il y a lieu de prendre à long terme envers elle.

Ière PARTIE

POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Nous étudierons successivement dans cette partie :

- les différentes substances polluantes, leur toxicité, les problèmes que leur émission pose

- les cas particuliers de pollution très aiguë pour des raisons locales d'ordre climatique, industriel ou simplement de concentration urbaine

- les phénomènes d'échelle planétaire, qui pourraient entraîner des changements profonds du climat ou de l'écologie.

Pour mieux saisir la signification des teneurs des différents polluants, que nous serons amenés à donner dans le cours de l'exposé, il sera utile de les comparer avec les valeurs suivantes, qui correspondent à la composition moyenne de l'atmosphère.

TENEURS MOYENNES DES PRINCIPAUX COMPOSANTS

DE L'ATMOSPHERE

Substance ou élément	*Formule chimique*	*Concentration dans l'air*		*Remarques*
		Quantité	*Unité*	
Gaz				
Azote	N_2	78,101	pour cent (v)	Constant
Oxygène	O_2	20,946	pour cent (v)	Constant
Argon	Ar	9 170	ppm (v)	Constant
Néon	Ne	18,2	ppm (v)	Constant
Hélium	He	5,24	ppm (v)	Constant
Krypton	Kr	1,14	ppm (v)	Constant
Xénon	Xe	0,086	ppm (v)	Constant
Vapeur d'eau	H_2O	~ 2	pour cent (v)	Très variable
Ozone	O_3	~ 2	pphm (v)	Variable (voir texte)
Hydrogène	H_2	50	pphm (v)	Apparemment constant
Anhydride carbonique	CO_2	317	ppm (v)	Variable au niveau du sol
Oxyde de carbone	CO	~ 10	pphm (v)	Variable
Méthane	CH_4	1,5	ppm (v)	Apparemment constant
Protoxyde d'azote	N_2O	30	pphm (v)	Variable au niveau du sol
Oxyde azotique	NO	~ 0,01	pphm (v)	Très variable
Peroxyde d'azote	NO_2	~ 0,1	pphm (v)	Très variable
Ammoniac	NH_3	~ 0,5	pphm (v)	Très variable
Anhydride sulfureux	SO_2	~ 1	pphm (v)	Très variable
Hydrogène sulfuré	H_2S	~ 1	pphm (v)	Très variable
Chorure d'hydrogène	HCl	~ 1	pphm (v)	Valeur probable très variable
Brome	Br_2			(Taux de concentration
Iode	I_2			très faible)
Particules				
Chlorure	Cl^-	~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Sulfate	SO_4^{2-}	~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Nitrate	NO_3^-	~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Ammonium	NH_4^+	~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Sodium	Na^+	~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Potassium	K^+	~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Calcium	Ca^{2+}	~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Magnésium	Mg^{2+}	~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Quartz	SiO_2	~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Argile		~ 1	$\mu g/m^3$	Très variable
Substances organiques		~ 5	$\mu g/m^3$	Très variable

Unités: $\mu g/m^3$: 10^{-6} gramme par mètre cube d'air à la pression du niveau du sol
pour cent (v): pour cent du volume
ppm (v): 10^{-6} partie du volume
pphm (v): 10^{-8} partie du volume

1. Les différents polluants

Le tableau suivant donne les quantités annuelles relâchées dans l'atmosphère des principaux polluants et de quelques autres substances, du fait de l'activité humaine et des sources naturelles.

(ce tableau est dû à J.E. Lovelock)

Gaz	Emission due à l'activité humaine	Emission naturelle	Période
CO_2	14	140	2 - 5 a
CO	0,28	0,1	3 a
CH_4	-	2,0	16 a
Hydro-carbures..	0,1	0,1	-
H_2S	0,003	0,1	2 j
SO_2	0,14	-	4 j
NO_k	0,05	0,5	5 j
N_2O	-	0,6	4 a
NH_3	-	1,2	7 j
O_2	- 10	100	1 000 a
	(Quantités exprimées en 10^9T)		

1.1. *L'oxyde de carbone CO*

Les émissions d'origine artificielle, donc de l'ordre de 280 MT pour le monde (5 MT pour la France) sont dues pour la plus grande part aux véhicules (98 % dans les pays développés) ; le reste est à mettre au compte des installations de combustion.

Effets. L'action sur le sang de l'oxyde de carbone par doses importantes susceptibles d'entraîner la mort est bien connue. Par contre les teneurs qu'il est possible de trouver dans les endroits les plus pollués, les grandes villes, sont évidemment beaucoup plus faibles et ont donné lieu à des observations contradictoires. Il semble toutefois que la formule sanguine subisse des changements.

Problème posé. Depuis quelques années, une baisse des teneurs de ce polluant a été constatée dans les grandes villes des pays développés qui étaient les plus polluées, ainsi qu'on peut le voir sur le tableau suivant :

EVOLUTION DES TENEURS MOYENNES ANNUELLES EN CO A PARIS

Années	62	63	64	65	66	67	68	69	70
p.p.m. (volume) CO	21,0	31,5	23,9	24,3	24,6	25,9	24,4	20,1	15,2

Celle-ci est imputable aux installations de combustion, dont les progrès de la conception réalisés après guerre se sont faits lentement sentir, au gré des remplacements et des améliorations des matériels anciens. Le faible niveau, obtenu maintenant, de leur contribution aux émissions de ce polluant, nous permet de circonscrire le problème au trafic automobile.

Une augmentation notable des teneurs en oxyde de carbone semble inacceptable, et conduit, compte tenu de la croissance que l'on peut à juste titre supposer du trafic automobile en l'absence de toute mesure :

- soit à reconcevoir les grandes villes et la vie de leurs habitants en tenant compte de cette donnée ; nous renvoyons à la sous-partie suivante l'examen des implications d'un tel choix ;

- soit à diminuer la production d'oxyde de carbone de chaque véhicule ; nous approfondirons cette possibilité dans la troisième partie de cette étude.

1.2. *L'anhydride sulfureux* SO_2

Sur les 140 MT rejetées annuellement, la France est redevable de 2,2 MT. 90 % de ce total provient du soufre des combustibles fossiles, et se dégage lors de leur combustion. Le reste est rejeté par un certain nombre d'industries :

- les industries métallurgiques, car les minerais contiennent souvent des sulfures ; la sidérurgie est, par les quantités traitées, la principale concernée ;

- l'industrie du ciment, dont les matières premières: calcaire, argile, marne, peuvent contenir des sulfates alcalino-terreux et des sulfures de métaux lourds ;

- l'industrie de l'acide sulfurique.

Les opérations de raffinage aboutissent à concentrer dans les produits lourds, le soufre des hydrocarbures bruts. La circulation automobile, qui n'utilise que des produits légers, n'est donc pas une source de ce polluant.

Effets. Il apparaîtrait d'après certains, une corrélation entre la teneur en anhydride sulfureux et les maladies respiratoires non tuberculeuses, bronchite chronique, emphysème,

asthme. Du fait de leur importance dans la morbidité et la mortalité générale puisque :

- l'asthme atteindrait 3 à 5 % de la population,

- 35 % de l'absentéisme de la population active proviendraient de ces maladies,

- 10 % de la mortalité générale seraient dus à la bronchite chronique,

on conçoit la nécessité de limiter au maximum les émissions de ce polluant.

Sur les végétaux, la toxicité de l'anhydride sulfureux, qui dépend du temps d'exposition, apparaît avec des teneurs très faibles de l'ordre de 0,5 p.p.m. (en volume).

Enfin l'acidité croissante des eaux de pluie devrait être attribué au dioxyde de soufre, principal polluant acide.

Les teneurs suivantes ont été relevées à Paris intra-muros :

Années	62	63	64	65	66	67	68	69
p.p.h.m. (volume) SO_2	7	6,5	6,4	5,3	4,7	5	4,5	4,2

Problème posé. Tout schéma de croissance déterminé à partir des bases actuelles de l'économie impose une expansion des industries, auxquelles les émissions de dioxyde de soufre sont imputables : raffinage des hydrocarbures, production d'électricité thermique, métallurgie, installations de combustion industrielles et domestiques. Bien évidemment, il existe dans beaucoup des cas précédents, une possibilité de substitution de l'énergie thermique par l'énergie nucléaire ; il semble toutefois difficile de stopper dans un proche avenir toute croissance de la première en raison d'un faisceau de contraintes :

- des progrès technologiques importants (surrégénérateurs) sont en train de se faire nécessitant une mise au point longue et minutieuse des matériels,

- la politique actuelle devrait être révisée, ce qui nécessiterait soit un délai assez long, soit d'importants sacrifices, à cause de l'inertie des secteurs économiques touchés, particulièrement lourds à manier.

La question est donc d'examiner si des procédés existants doivent permettre de limiter, voire diminuer, les rejets de dioxyde de soufre sur la base de l'augmentation au taux actuel de ces industries.

Deux actions sont possibles :

- la désulfuration des combustibles fossiles,

- la désulfuration des effluents gazeux.

La désulfuration des combustibles fossiles

Les charbons peuvent contenir jusqu'à 5 % de soufre. Des méthodes physiques depuis le tri à la main jusqu'à la flottation ou au moussage peuvent être employées. Aux Etats-Unis, une méthode chimique de désulfuration à l'hydrogène a été utilisée, renchérissant le coût du charbon de 50 %.

Les pétroles renferment aussi jusqu'à 4-5 % de soufre. Seulement 12 à 15 % des réserves mondiales de brut sont à basse teneur en soufre (B.T.S.) et de plus incluent peu de produits lourds, ce qui nécessite le recours aux hydrocarbures sulfureux. Les procédés de désulfuration sont classés en deux catégories :

- méthodes de désulfuration directe qui consistent à éliminer le soufre des hydrocarbures ; leurs coûts deviennent prohibitifs si l'on veut abaisser la teneur en soufre au-dessous de 1 %.

- méthodes de désulfuration indirecte, qui permettent après distillation sous vide, de diminuer jusqu'à 0,25 % la teneur en soufre du distillat, pour lequel la désulfuration précédente est plus facile ; le soufre se concentre dans le résidu de distillation (40 % du fuel initial).

Ces méthodes permettent de concentrer 90 % du soufre contenu dans un résidu de 20 % du fuel initial, pour un prix à la tonne de fuel traité d'environ 40 à 50 F/T, ce qui correspond à 8-10 % de son prix de revient.

La désulfuration des effluents gazeux

Il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine, pour passer des essais à l'installation d'unités de grande capacité. Pourtant un effet d'échelle important joue, qui rend impraticable économiquement l'épuration des gaz de combustion émis par les petites installations, domestiques par exemple. On peut avancer un coût de l'ordre de 10 à 25 F par tonne de fuel brûlé, pour un rendement de désulfuration de 90 %.

Une politique possible

Il semble particulièrement séduisant de combiner ces deux actions, sur les combustibles et sur les effluents, de façon à profiter de leurs avantages respectifs :

- concentrer 90 % du soufre dans 20 % du fuel,

- brûler dans les petites installations le fuel désulfuré,

- brûler les résidus soufrés dans les grandes installations pour lesquelles l'épuration des gaz de combustion est bon marché.

Un coût global de 10 à 15 % du prix du combustible, par rapport à une réduction au dizième des émissions de dioxyde de soufre par unité de fuel brûlé, n'apparaît donc pas mettre en péril un schéma de croissance directement extrapolé des bases actuelles.

1.3. *Les oxydes d'azote*

50 MT en sont émis chaque année, dont environ 1 MT pour la France. Les véhicules automobiles, les installations de combustion à part à peu près égale, et l'industrie pour une plus faible contribution se partagent les rejets d'oxydes d'azote.

La moyenne des teneurs en dioxyde d'azote NO_2 ont été à Paris :

- 2,6 p.p.h.m. (volume) en 1969

- 2,3 p.p.h.m. (volume) en 1970.

Effets. Ils sont peu connus pour l'instant. Les oxydes d'azote semblent des irritants bronchiques, sensibilisant aux infections pulmonaires et aggravant les effets de polluants tel le dioxyde de soufre.

Problème posé. La diminution des quantités d'oxydes d'azote formées lors de combustions, appelle apparemment des procédés contradictoires, avec la solution du problème de l'oxyde de carbone ; en effet la combustion devrait être plutôt réductrice pour empêcher la formation d'oxydes d'azote, plutôt oxydante pour que le carbone soit oxydé à l'état de gaz carbonique. La question est loin d'être résolue aussi bien sur ce point, que sur l'épuration des effluents rejetés.

Toutefois des procédés relativement coûteux ont été mis au point pour certains cas :

- combustion à deux étages, l'un oxydant (oxydation du CO en CO_2) l'autre réducteur (réduction des oxydes d'azote à l'état de N_2)

- brûleurs à émulsion, où de la vapeur d'eau est injectée, ce qui diminue la température de la flamme

- réduction catalytique des effluents gazeux chargés en oxydes d'azote.

Nous reviendrons sur le dernier point précédent plus en détail, lorsque nous traiterons dans la 3ème partie le problème du trafic automobile dans son ensemble.

Sur le plan prospectif si l'on ne veut pas augmenter les émissions d'oxyde d'azote dans la même proportion que l'activité industrielle, un sérieux effort technologique doit être effectué.

1.4. *Les poussières*

Chaque année 130 MT de particules de toutes natures sont émises par l'activité humaine. Comme on le verra dans la sous-partie relative aux phénomènes planéraires, cette quantité est faible, par rapport à ce que les sources naturelles rejettent dans l'atmosphère. Néanmoins, la production de ces dernières est souvent diffuse sur l'ensemble du globe (poussières arrachées au sol, sel des océans) ; dans d'autres cas, le flot des poussières est envoyé dans la haute atmosphère (débris météoriques, éruptions volcaniques), d'où il se répartit sur l'ensemble de la planète. Ceci n'aboutit, en général, pas à des concentrations de polluants localement élevées, et rend les effets néfastes sur les organismes de la production naturelle, paradoxalement beaucoup moins importants que ceux des émissions humaines.

Le tableau suivant donne une estimation des quantités rejetées suivant différents secteurs d'activité, d'après L. Matcha :

secteurs	particules >5 microns	particules 5 < microns	pourcentage
Transports	0,4	1,8	2 %
Combustion	33,8	9,6	33 %
Industrie	44	12,4	42 %
Déchets solides	2	0,4	2 %
Divers	23,4	5,4	21 %
Total	103,6	29,6	
	(millions de T/an)		

Effets. La classification en deux catégories des poussières suivant qu'elles sont de taille inférieure ou supérieure à 5 microns, correspond à l'action mécanique qu'elles ont sur le système respiratoire humain :

- au-delà de 5 microns, les particules sont arrêtées par impact sur les muqueuses des voies respiratoires supérieures ; elles peuvent alors être rejetées ou dégluties

- en-deçà de 5 microns, elles peuvent se déposer tout le long de l'arbre trachéobronchique ; les alvéoles sont atteintes par des poussières de 1 micron.

La composition des particules, ainsi que celle des gaz et liquides qu'elles peuvent retenir par absorption, sont multiples et déterminent largement leur action sur l'organisme. Les poussières peuvent par exemple se dissoudre et passer dans le sang au niveau des parois alvéolaires. Beaucoup d'autres possibilités peuvent se produire. Nous regarderons plus en détail le cas des poussières contenant du plomb rejetées par l'échappement des moteurs à essence, et celui de particules de certains métaux comme le vanadium, le manganèse, le cobalt.

Le plomb. Le plomb rejeté par la circulation automobile se trouve en teneur assez élevée sur le bord des chaussées, et s'accumule dans l'herbe près des routes (100 p.p.m. sur les talus séparant les voies d'autoroute, 10 p.p.m. à 100 m. de ces dernières). On a constaté parfois sur du bétail se nourrissant trop près du trafic, des intoxications aiguës par le plomb.

Vd, Mn, Co. Les particules de ces métaux présentent avec l'anhydride sulfureux des effets synergétiques particulièrement néfastes. Ce sont des catalyseurs de son oxydation en anhydride sulfurique qui avec l'humidité ambiante donne rapidement de l'acide sulfurique. Il reste souvent adsorbé par les poussières. On conçoit facilement leurs propriétés corrosives sur les choses, irritantes sur le système trachéobronchique des organismes.

Problème posé. Pour diminuer les émissions de particules, on peut bien sûr améliorer les procédés de combustion, ou les techniques industrielles. Parfois même, l'élimination d'impuretés contenues par une substance avant son utilisation, empêche la formation de poussières particulièrement nocives (le vanadium dans les hydrocarbures par exemple). La méthode de très loin la plus générale est quand même ici le traitement des effluents gazeux, dont les techniques très nombreuses sont bien maîtrisées. Il existe en effet des systèmes de dépoussiérage :

- mécaniques, à gravité, à inertie ou à force centrifuge (cyclone)
- humides, à lèchage, à lavage ou à pulvérisation
- à couche poreuse, papier ou tissu
- électriques.

Le choix du procédé à retenir dépend des poussières à arrêter (taille, constantes physiques et du fluide porteur (température, composition). On pourra juger de l'efficacité atteinte actuellement grâce au tableau suivant, établi par Mr. J.P. Detrie.

EFFICACITE DES DEPOUSSIEREURS

Dépoussiéreurs	*Efficacité en %, particules de 5 μ*	*Efficacité en %, particules de 2 μ*	*Efficacité en %, particules de 1 μ*
Cyclone moyenne efficacité	27	14	8
Cyclone haute efficacité	73	46	27
Cyclone cellulaire à faible perte de charge	42	21	13
Cyclone tubulaire	89	77	40
Cyclone humide	87	60	42
Dépoussiéreur électrique	92	85	70
Dépoussiéreur électrique humide.	98	97	92
Filtre à manche	99,9	99,9	99
Tour à pulvérisation	94	87	55
Scrubber à impact humide.....	97	92	80
Dépoussiéreur à pulvérisation induite	93	75	40
Désintégrateur	98	95	91
Venturi humide	99,6	99	97

L'équipement en dépoussiéreurs efficaces est donc dès maintenant possible au moins sur les usines nouvellement construites, à un coût supportable pour la collectivité. Pour les installations industrielles vétustes, dont les effluents ne sont pas dépoussiérables économiquement, la mise au rebut interviendra d'autant plus tôt que la croissance sera plus rapide : le problème des poussières ne semble donc pas un facteur de limitation de l'expansion industrielle.

On voit mal par contre, comment les petites installations comme les chauffages domestiques pourraient supporter la charge de dépoussiéreurs élaborés. Certains appareils simples (les capte-suie) existent, qui malheureusement n'arrêtent que les particules les plus grosses. De toute façon, ces petits équipements ne constituent un problème qu'en milieu urbain, où leur nombre est élevé ; ils sont alors remplaçables par un système collectif de chauffage urbain, pour lequel on peut envisager facilement le traitement des poussières.

1.5. *Divers*

Il n'est évidemment pas possible d'énumérer ici toutes les autres substances susceptibles d'être dans certains cas des polluants. Citons :

Les composés fluorés

Ils sont toxiques à de très faibles doses pour les végétaux, et se concentrent dans les parties aériennes des plantes. Les aiguilles des résineux et les feuilles des autres arbres y sont particulièrement sensibles. Par ingestion de fourrage, qui accumule

facilement les fluorures, les animaux d'élevage peuvent contracter la fluorose, maladie qui se caractérise par une altération des dents et du squelette. Les vers à soie et les abeilles peuvent aussi être intoxiqués par leur nourriture, feuilles de mûrier, pollen.

Les deux principales industries polluantes sont :

- la métallurgie de l'aluminium qui utilise la cryolithe comme fondant et émet lors de l'électrolyse de l'alumine des substances allant du gaz fluorhydrique à la cryolithe elle-même . Des vallées alpines sont assez fortement polluées par cette industrie;

- l'industrie des engrais phosphatés, qui lors de l'attaque par l'acide sulfurique des phosphates naturels, contenant des fluorures les rejette dans l'environnement.

Des procédés ont été mis au point permettant le traitement des gaz fluorés avec un très bon rendement. Là comme ailleurs, reste le problème de sa généralisation à l'industrie.

Les micropolluants organiques

Certains composés organiques peuvent être cancérogènes ou tératogènes à l'état de traces. Leurs actions sont actuellement très mal connues, surtout à long terme. Ils peuvent présenter des effets synergétiques avec d'autres substances. Toute activité ayant un rapport avec les hydrocarbures est susceptible d'en introduire dans l'environnement.

2. La pollution atmosphérique d'un point de vue régional

Cette sous-partie est consacrée aux conditions locales particulières susceptibles de rendre très préoccupantes les questions soulevées par la pollution. En effet, bien que dans certains cas le niveau moyen des nuisances reste faible, il peut s'élever en des endroits localisés, pour des périodes restreintes, jusqu'à atteindre des valeurs dangereuses, au moins pour certaines catégories particulièrement fragiles de la population. De cette possibilité témoignent les trois accidents bien connus, de la vallée de la Meuse en Belgique (1930), de Donora aux Etats-Unis (Pennsylvanie), de Londres (1952).

Nous regarderons d'abord les facteurs de la bonne diffusion des polluants rejetés dans l'atmosphère. Celle-ci est fortement liée au climat, et nous serons ensuite amenés à discuter les conséquences que peuvent avoir sur eux, l'urbanisation et l'industrialisation, principales modifications d'origine humaine du milieu. En conclusion, nous examinerons une stratégie possible face à ces problèmes.

2.1. *Les facteurs de la diffusion atmosphérique des polluants*

- Ce sont tout d'abord les caractéristiques physiques de l'effluent à son rejet. Plus l'effluent s'élevera, meilleure sera

sa dispersion. Celle-ci croîtra donc lorsque :

. la densité de l'effluent diminuera,

. sa vitesse de sortie augmentera :

J.P. Détrie a pu noter une élévation du panache de 14 m pour { une vitesse du vent de 5 m/s / une vitesse d'éjection de 10 m/s }

. la température des gaz augmentera:pour un vent de 5 m/s, entre 100 et 200 ° C on a pu relever, d'après J.P. Détrie une surélévation du panache de 1,5 m/°C

. la taille des particules en suspension diminuera.

- Les conditions météorologiques ont une grande influence sur le mélange de l'effluent avec l'atmosphère. Nous étudierons successivement les données atmosphériques de la dispersion des effluents, puis les cas spécifiques créant des situations météorologiques particulières : vallées, étendues d'eau.

a) La turbulence de l'atmosphère

Elle facilite la répartition de l'effluent au sein de l'atmosphère. Elle est de nature :

- mécanique lorsqu'elle est provoquée par le passage du vent sur les aspérités du sol et le relief,
- ou thermique quand elle est causée par les différences de température régnant au sein de l'atmosphère ; la nature du sol joue ici aussi un rôle important, par son pouvoir d'absorption du rayonnement solaire.

La répartition des températures avec l'altitude joue aussi un rôle direct sur l'élévation de l'effluent rejeté . On peut classer l'atmosphère en plusieurs catégories suivant que de ce point de vue :

- elle facilite les mouvements verticaux des gaz ; elle est alors instable,
- elle est neutre, on l'appelle indifférente,
- elle empêche ces mouvements de se produire ; on l'appelle alors dans ce cas stable.

Une atmosphère stable gêne considérablement la dispersion des polluants. Un cas particulier de grande stabilité atmosphérique, est l'inversion de température, cause des accidents précédents. Elle consiste en la présence d'une couche d'air, où la température croît avec l'altitude , et qui est difficilement franchissable par les effluents. Elle se produit souvent la nuit,

lorsque le sol se refroidissant plus vite que l'air par rayonnement, abaisse la température des couches basses de l'atmosphère par rapport aux plus hautes. Le soleil, par son rayonnement, la brise en général, en ayant l'effet exactement inverse. Il se peut que son action soit insuffisante en hiver, surtout lors de la présence de brouillard, arrêtant ses rayons. Ce dernier les absorbe d'ailleurs partiellement et s'échauffe, élevant la température des couches hautes de l'air et accentuant l'inversion.

Un vent fort empêche en général des conditions atmosphériques stables de s'instaurer, telles les inversions de température. En retour, en rabattant les effluents il diminue leur dispersion.

b) Influence de la topographie

Au fond des vallées, l'air froid s'accumule par gravité ; ceci favorise la condensation de la vapeur d'eau et la formation de brouillards, qui à leur tour accentuent le refroidissement des basses couches. On comprend que les vallées soient habituellement le siège d'inversions de température ; l'air y est particulièrement stable et la concentration en polluants forte. Comme par ailleurs elles sont propices à l'établissement d'industries de toutes sortes en général assez polluantes (papeteries, cimenteries, électro-métallurgie, électrochimie), elles demandent une étude approfondie dans chaque cas particulier.

Les masses d'eau importantes réagissent avec retard aux sollicitations thermiques : sur les zones côtières, la brise souffle de la terre le jour, vers la terre la nuit, ce qui ramène les polluants vers leur lieu d'émission. Le cas de Los Angelès, situé sur une plaine bordée d'un côté par des montagnes, de l'autre par le Pacifique est à ce point de vue typique.

2.2. *Les conséquences de l'urbanisation et de l'industrialisation*

Ce sont, sur le climat et la pollution, principalement les trois suivantes :

La modification des échanges thermiques par rayonnement

En effet, les prairies, bois et champs, relativement humides, font place aux parkings, immeubles et édifices de toute sorte, dont le pouvoir d'absorption du rayonnement solaire est beaucoup plus élevé. Ceci se traduit par une augmentation de la chaleur reçue par le milieu, à laquelle s'ajoute celle qu'utilisait primitivement l'évaporation de l'eau retenue par le sol et les végétaux (l'accroissement total peut s'élever jusqu'à 30 ou 50 %). Ce phénomène transforme les villes en îlots de chaleur par rapport à la campagne environnante ; la différence de température est surtout sensible le soir et au début de la nuit, et peut atteindre 10° C compte tenu des chauffages domestiques.

La nébulosité est accrue par l'augmentation des nuages convectifs, une brise ville-campagne s'établit aux heures de grande différence thermique. Les instabilités latentes des masses d'air se révèlent au passage des zones urbaines et font croître la pluviosité. Ces faits entraînent pour le citadin un inconfort certain que l'on peut considérer comme une nuisance afférente à l'urbanisation.

L'accroissement de la turbulence de l'air

Elle est due aux bâtiments de taille élevée,de forme cylindrique ou parallélépipédique, qui créent au passage du vent des zones tourbillonnaires rabattant parfois les effluents gazeux (les cheminées ont elles-mêmes un effet de cette sorte). La présence de couloirs étroits entre édifices augmente la vitesse du vent, ce qui cause une gêne sensible aux piétons.

L'augmentation des teneurs en divers polluants

Elle découle du trafic automobile, des chauffages domestiques et des concentrations industrielles au voisinage des villes. Elle entraîne une réduction du rayonnement solaire reçu par le sol et de ce fait favorise la formation de brouillards et d'inversions de température, qui viennent à leur tour aggraver la cause.

Un exemple de forte pollution urbaine est donné par Los Angeles et son smog oxydant, en raison de la décomposition photochimique de l'hemioxyde d'azote libérant de l'ozone :

$$N_2O + O_2 \longrightarrow N_2 + O_3 \text{*}$$

Les hydrocarbures rejetés réagissent à leur tour sur l'ozone pour donner des composés très irritants.

La multiplication des réfrigérants atmosphériques des grandes centrales électriques au sein de régions peu étendues, risque de provoquer une augmentation locale de l'humidité de l'air, partant un accroissement de la nébulosité et des précipitations, dont nous avons vu plus haut les implications sur le bilan radiatif des zones considérées. Le paragraphe consacré à l'énergie électrique de la troisième partie reprendra ce point que nous ne faisons que signaler ici.

(*) Mr. J.P. DETRIE propose à la place la chaîne de réactions où le dioxyde d'azote NO_2 joue le rôle de catalyseur :

$$NO_2 + O_2 \longrightarrow NO + O_3 \quad \text{(photosynthèse)}$$

$$NO + O_2 \longrightarrow NO_3$$

$$NO_3 + O_2 \longrightarrow NO_2 + O_3$$

$$3O_2 \longrightarrow 2O_3$$

2.3. *Implications sur l'attitude à prendre face aux problèmes locaux de pollution*

Traiter convenablement les questions locales posées par les nuisances impose de considérer des régions homogènes de ce point de vue. Dans chaque zone un tableau d'ensemble des sources polluantes devra être dressé, incluant notamment :

- les sources naturelles, vent et végétaux
- les sources agricoles : pesticides et végétaux cultivés
- les sources thermiques, trafic automobile, rejets industriels.

Il faudra arrêter des limites que la pollution ne devra pas dépasser, prenant comme critère la finalité retenue pour chaque zone ; ceci permettra (en théorie) de juger tout fait nouveau, implantation industrielle ou expansion urbaine, qui pourrait modifier l'état de pollution régnant antérieurement. Seul un modèle global régional, qui donnerait pour résultat le niveau des nuisances, founrirait le moyen d'apprécier ce fait de façon objective.

Un remède simple à l'urbanisation serait la dilution des édifices au sein d'espaces verts. Reste à savoir dans cette perspective si l'extension actuelle des villes, qu'elle soit facteur ou effet, est indissociable de l'expansion économique.

3. Les phénomènes planétaires

Le sujet abordé ici est actuellement pour la plus grande part un large champ d'investigations. Aussi ne pouvons-nous qu'avancer des hypothèses, qui restent à prouver de manière véritablement scientifique.

Après un exposé des mécanismes qui sont supposés régir le climat du globe, nous examinerons les émissions de polluants qui peuvent avoir une action à cette échelle ; enfin, avant de formuler une conclusion, qui restera au demeurant dans l'expectative sur beaucoup de points, nous rappellerons les seules modifications du climat que l'on a pu constater depuis la révolution industrielle.

3.1. *Les mécanismes supposés*

Parmi les substances dont l'incidence sur le climat pourrait ne pas être neutre, seules trois sont émises ou interviennent en quantité suffisante pour jouer un rôle planétaire. Ce sont :

- le gaz carbonique,
- la vapeur d'eau,
- les poussières.

Nous regarderons successivement les hypothèses que l'on peut avancer concernant leur action avant d'étudier le facteur d'instabilité constitué par les calottes polaires.

Le gaz carbonique

Il laisse passer les rayons solaires visibles, mais arrête les infra-rouges réémis par la terre. Si sa concentration croît, la température moyenne d'équilibre de la terre augmente, par effet de serre.

Deux équilibres écologiques, dont on peut difficilement conjecturer le déplacement, viennent compliquer le problème :

a) L'équilibre gaz carbonique atmosphérique - gaz carbonique dissous dans les océans.

La solubilité du gaz carbonique diminue avec l'augmentation de la température ; ceci serait donc un facteur d'instabilité en cas d'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz carbonique. Néanmoins, un tel phénomène ne mettrait en jeu que les couches d'eau superficielles, compte tenu d'un turn over des masses d'eau océaniques dont les auteurs évaluent la durée entre 1 000 et 10 000 ans. En conséquence on ne sait guère évaluer les quantités que rejetteraient les mers, dans un pareil cas.

b) L'équilibre gaz carbonique - oxygène

L'oxygène devient gaz carbonique par combustion, et est régénéré par photosynthèse à partir de celui-ci. La photosynthèse proviendrait selon un spécialiste américain :

- pour 40 % des végétaux terrestres
- pour 60 % de la chaîne écologique marine (phytoplancton)

et serait, en tant que réaction chimique, accélérée par un accroissement de la température. On conçoit que cet équilibre puisse modérer l'emballement que certains prévoient, si les masses d'eau océanique relâchaient leur gaz carbonique dissout.

Dans un tout autre ordre d'idées, une conclusion s'impose : la dépendance dans laquelle l'écologie se trouve vis-à-vis du phytoplancton, dont la vulnérabilité est actuellement mal connue, nécessite de ne rejeter des effluents dans le milieu marin qu'avec prudence.

La vapeur d'eau

Sous forme de vapeur, elle est la cause d'un effet de serre analogue aux précédents. Sous forme condensée de gouttelettes, elle arrête le rayonnement solaire ; une augmentation de la nébulosité aurait pour conséquence, toutes choses égales par ailleurs, une

diminution de la température du globe : un modèle simple, comportant des nuages à trois altitudes différentes, a montré qu'à 1 % d'augmentation de la couche la plus basse correspondait une baisse de la température terrestre de 1° C.

Si la température s'élève, il est probable que la quantité d'eau contenue dans l'air croîtra. Elle jouera un rôle stabilisateur ou non suivant que l'augmentation se fera sous forme condensée ou sous forme de vapeur.

Les poussières

Deux hypothèses peuvent être avancées ; elles peuvent :

- soit avoir un effet absorbant et donc augmenter la température d'équilibre du globe (comme semblerait le prouver l'éruption du Mont Agung de Bali en 1963, à propos de laquelle on a constaté une augmentation de la moyenne de température de 8° C quelques mois plus tard),

- soit en réfléchissant le rayonnement solaire, la diminuer.

Il semble difficile de tirer une conclusion définitive des faits constatés jusqu'à présent.

Les calottes glaciaires

Du pouvoir réfléchissant de la glace résulte une absorption beaucoup plus faible de la chaleur solaire par les parties terrestres qui en sont couvertes. Une variation de la température globale en entraîne une en sens opposé de la surface recouverte par les glaces polaires ; ceci à son tour se traduit par une variation du rayonnement solaire absorbé de même sens que la variation de température et concourt donc à accroître le phénomène. Les calottes glaciaires constituent donc un facteur de particulière instabilité thermique.

Des modèles ont, semble-t-il, mis en évidence deux états stables pour la terre, de ce point de vue. Dans l'un les glaces recouvrent l'ensemble de la planète, alors que l'autre correspond à la disparition totale des calottes polaires (d'après M.I. Budyko). Pour les deux cas la température serait à peu près constante sur l'étendue du globe, à altitude constante.

3.2. *Les émissions de polluants*

Le terme de polluant correspond ici aux corps dont il a été question au paragraphe précédent.

Le gaz carbonique

D'après un auteur américain, en 4 milliards d'années, le volcanisme en aurait rejeté 40 000 fois la quantité contenue actuellement

dans l'air. Ces émissions se retrouveraient maintenant :

- pour trois quarts, sous forme de carbonates, dont la plus grande partie serait renfermée par les roches et les sédiments (calcaires, marnes, etc...) ; le reste serait dissout dans les océans ;

- pour le dernier quart, sous forme de matière organique obtenue par photosynthèse ; l'oxygène dont la planète dispose aurait été obtenu par cette voie.

A l'homme ne seraient imputables que 20 % du gaz carbonique atmosphérique, émis par combustion.

La vapeur d'eau

Les sources artificielles sont particulièrement modestes par comparaison avec l'évaporation et l'évapotranspiration naturelles (L. Matcha) à l'échelle mondiale, et ne peuvent être déterminantes que localement. Il demeure que l'équilibre masses d'eau océanique - eau atmosphérique peut jouer un rôle stabilisateur ou non comme nous l'avons noté au paragraphe précédent, suivant la façon dont il réagit aux sollicitations (d'ordre thermique par exemple).

Les poussières

Les deux tableaux suivants donnent la production de particules provenant respectivement de sources naturelles et d'activités humaines.

Production mondiale de particules provenant, directement ou indirectement, de sources naturelles (chiffres estimatifs)[1]

(en millions de tonnes métriques par an)

	>5 microns[2]	<5 microns[2]
	Emission directe	
Sel de mer	500	500
Poussières véhiculées par le vent	250	250
Feux de forêts	30	5
Débris de météores	10	0
Eruptions volcaniques	?	25[3]
Total	790+	780+
	Particules formées à partir de gaz	
Sulfates	85	335
Hydrocarbures	0	75
Nitrates	15	60
Total	100	470

Nombre estimatif, pour l'ensemble du globe, de particules provenant d'activités humaines (directement ou indirectement)[1]

(en millions de tonnes métriques par an)

	1968		2000
	> 5 microns	< 5 microns	< 5 microns
		Emission directe[4]	
Transport	0,4	1,8	
Sources fixes (combustibles)	33,8	9,6	
Processus industriels	44,0	12,4	
Déchets solides	2,0	0,4	
Divers	23,4	5,4	
Total	103,6	29,6	100
		Particules formées à partir de gaz[4]	
Sulfates	20	200	450
Nitrates	5	35	80
Hydrocarbures	0	15	50
Total	25	250	580

[1]D'après J. T. Peterson et C. E. Junge, *Sources of particulate matter in the atmosphere,* Study of Critical Environmental Problems. Mass. Inst. Technology, Williamstown, Mass. Workshop of 1970. (Paraîtra en 1971.)

[2]Le symbole > 5 indique les particules dont le diamètre est supérieur à 5 microns, tandis que celles dont le diamètre est inférieur à 5 microns sont désignées par < 5. Un micron est égal à un dix-millième de centimètre.

[3]Les émissions volcaniques varient considérablement d'une année à l'autre.

[4]Les chiffres donnés pour les années 1968 et 2000 sont ceux enregistrés en 1968.

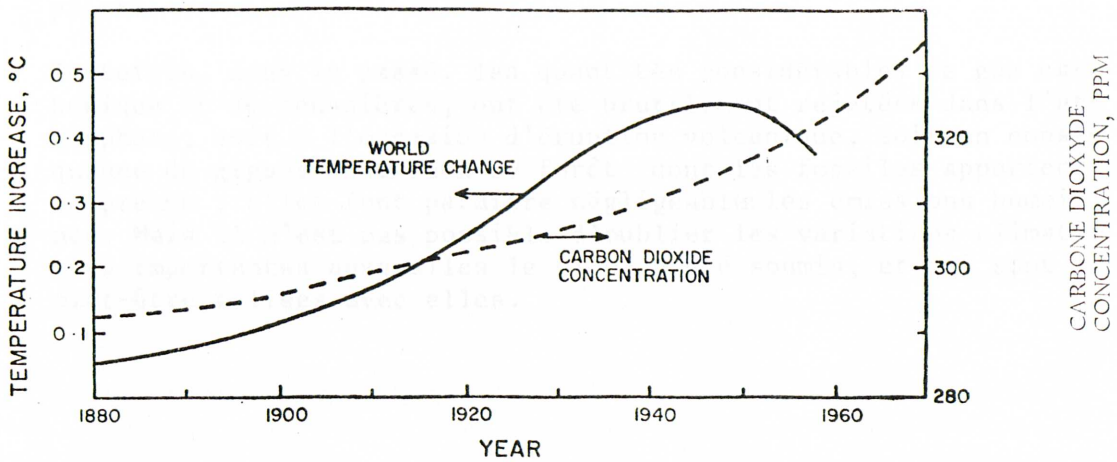
La distinction entre poussières de taille inférieure à 5 microns et celles de taille supérieure, provient de leur comportement différent ; les plus grosses retombent vite sur le sol et disparaissent donc de l'air, tandis que les plus petites parviennent plus facilement dans la haute atmosphère ; de plus, ces dernières du fait de leurs dimensions comparables à la longueur d'onde du rayonnement solaire, jouent à masse égale un rôle plus important vis-à-vis du rayonnement solaire, que les autres.

Les émissions de gaz concourent parfois à la formation de particules ; ainsi l'anhydride sulfureux SO_2 (lui-même peut venir de l'oxydation par certaines bactéries du H_2S) peut donner par oxydation de l'anhydride sulfurique SO_3, susceptible de se combiner avec l'ammoniac NH_3, pour engendrer du sulfate d'ammonium, sel solide sous forme donc d'aérosol.

3.3. *Les faits*

On a constaté une augmentation séculaire :

- de la température moyenne de la terre et de la teneur en gaz carbonique de l'air, comme en attestent les deux courbes suivantes, retraçant l'évolution de ces deux grandeurs de 1880 à nos jours :



(d'après J.E. Lovelock)

température : croissance jusqu'en 1945, puis décroissance

teneur en gaz carbonique : croissance continue de 15 % en 100 ans.

- de la nébulosité moyenne de l'atmosphère et de la teneur en poussières de l'air avec donc, pour corollaire, la diminution de la transparence atmosphérique

- de la vapeur d'eau contenue dans la haute atmosphère (2 à 3 p.p.m. de 1964 à 1970) sans que la teneur en ozone varie.

Les mesures anciennes sont malheureusement très sujettes à caution, en raison des faibles moyens de l'époque. Une voie intéressante reste à creuser : les mesures indirectes de la transparence de l'atmosphère à partir des albedos des planètes, qui ont été étudiés depuis très longtemps.

On pourrait invoquer en les combinant subtilement les mécanismes du premier paragraphe pour justifier les faits précédents. Manquerait malheureusement la rigueur scientifique, car pour l'instant les modèles, de deux types, ont été tous insuffisants :

- les uns ne prennent en compte qu'un aspect de la réalité et sont donc trop simples pour l'expliquer

- les autres cherchent à l'intégrer dans son entière complexité et sont alors trop lourds pour obtenir des calculateurs des prévisions à long terme.

Certains, pessimistes, mettent en avant le spectre d'un emballement de la température terrestre, possible si, par exemple :

- le gaz carbonique par effet de serre et les poussières par absorption, amorcent le phénomène

- les océans relâchent du gaz carbonique, la teneur en vapeur d'eau de l'air croît, les glaces polaires fondent, accélérant le processus.

Cet enchaînement, pas plus que d'autres, n'est à éliminer à priori.

Toutefois, dans le passé, des quantités considérables de gaz carbonique et de poussières, ont été brutalement rejetées dans l'atmosphère, soit à l'occasion d'éruption volcanique, soit en conséquence de gigantesques feux de forêt dont les fossiles apportent la preuve ; elles font paraître négligeables les émissions humaines. Mais il n'est pas possible d'oublier les variations climatiques importantes auxquelles le globe a été soumis, et qui sont peut-être reliées avec elles.

IIème PARTIE

POLLUTION DES MILIEUX AQUATIQUES

Ce type de pollution présente une originalité très grande par rapport aux autres nuisances, laquelle provient d'au moins 3 points.

a) *Les phénomènes de concentration*. Par ceux-ci, des polluants peuvent se trouver dans certains organismes, sous des teneurs considérablement plus fortes qu'au sein du milieu extérieur. Ces processus existent sous deux formes :

- la concentration directe à partir du milieu ; elle est réalisée soit par des micro-organismes qui présentent une grande surface d'échange (plancton), soit par des organismes filtreurs, qui se nourrissent en filtrant de grandes quantités d'eau, comme l'huitre ; il est ainsi possible d'obtenir des teneurs déjà plusieurs centaines de fois celles du milieu ;

- la concentration le long des chaînes alimentaires ; chaque maillon qui se nourrit du maillon précédent, retient et concentre certains polluants contenus par celui-ci ; le phénomène se répète à chaque échelon et l'on peut parfois aboutir, en fin de chaîne, à un facteur de concentration de l'ordre du million. Ces processus se produisent aussi, bien entendu, dans le cas du système écologique terrestre. Le nombre bien moindre des étages de concentration le rend beaucoup moins important, ainsi que le fera sentir la comparaison suivante entre deux exemples de chaîne trophique.

  - chaîne terrestre : herbe, bovins, homme

  - chaîne marine : phytoplancton, zooplancton, coquillages, poissons, homme.

Les mesures effectuées sur le milieu ne permettent donc de préjuger, ni des teneurs atteintes au sein des organismes qui y vivent, ni des effets parfois démesurés qui peuvent résulter de certaines pollutions difficilement décelables. L'accident tristement fameux de la baie de Minamata au Japon, illustre parfaitement ce fait :

- une usine située sur cette baie rejetait dans ses effluents une quantité de mercure methyl estimée à 500 ou 1 000 g/jour ; celui-ci, dilué par les eaux de la baie, s'y trouvait en teneur infime ;

- par concentration le long des chaînes alimentaires, cette teneur se trouvait multipliée par un facteur de l'ordre de 100 000, pour aboutir à 10 ou 20 p.p.m. dans la chair des poissons ;

- l'ingestion chaque jour d'une quantité de 500 g à 1 kg de poisson, ce qui n'est pas déraisonnable dans le cas de pêcheurs japonais,

conduisait à une dose quotidienne de 10 mg ; ceci correspond à une quantité accumulée dans l'organisme de l'ordre de 1 g, largement suffisante pour provoquer l'apparition de l'intoxication.

(d'après J.M. Folz)

Ces phénomènes interdisent donc d'écarter le risque d'attaque généralisée à la planète, d'un chaînon de l'écosystème marin, par un polluant dont la concentration moyenne serait si faible qu'on ne pourrait la mesurer. Le C.E.R.B.O.M. a mis au point récemment, des méthodes d'étude in vitro très prometteuses, de l'évolution des teneurs le long des chaînes trophodynamiques particulières, choisies pour leur représentativité. Cependant, leur nouveauté, le nombre énorme de corps à tester, l'importance des mesures pour chaque substance, la difficulté d'extrapoler au reste de l'écosystème, représentent autant d'obstacles qui prendront longtemps pour être surmontés. C'est pourquoi la prise de conscience de l'attaque que nous venons d'évoquer pourrait être trop tardive pour autoriser toute mesure de sauvegarde. L'incidence de l'écologie marine sur tout ce qui se passe sur terre (la régénération de l'oxygène à partir du gaz carbonique par exemple, comme nous l'avons vu à propos des rapports entre la pollution et le climat: I, 2), impose donc de considérer ces possibilités avec le plus grand sérieux.

b) *Les télémédiateurs chimiques*. Ce sont des substances émises par une espèce qui en influence une seconde, pour laquelle ils sont soit des métabolites, soit de simples signaux. Leur action peut être plus ou moins directe (par exemple un corps rejeté par une espèce, peut agir sur une seconde qui en contrôle une troisième), et rend les divers maillons de l'écosystème très dépendants les uns des autres, ce qui accroît le risque précédent, et rend possible une dérive insidieuse de l'écologie.

(d'après M. Aubert)

c) *La capacité d'auto-épuration du milieu aquatique*.

Ce point joue en sens inverse du précédent. Le milieu aquatique possède les facultés :

- de dégrader la plupart des matières organiques et minérales (alors appelées biodégradables) par des mécanismes biologiques, utilisés d'ailleurs par notre économie, aussi bien sur un plan domestique (fosses septiques), qu'industriel (usines d'épuration),
- d'attaquer beaucoup de germes pathogènes par une triple action :
  - action "mécanique", dans les zones d'estuaire, de microprédateurs, qui parasitent les bactéries et les font éclater, et de macroprédateurs, qui s'en nourrissent,

. action antiseptique, dans la zone benthique, de certains rejets d'algues,

. action antibiotique, dans la même zone, des bactéries marines, et dans la zone pélagique (* *) du phytoplancton, par leurs émissions.

Néanmoins, cette capacité très intéressante d'absorption de la pollution n'est pas illimitée ; la limite dépassée, le risque est grand de voir se produire des mécanismes généralement jugés très nuisibles, comme l'eutrophisation.

Malgré les différences que nous venons de présenter, un plan proche de celui que nous avons suivi pour la pollution atmosphérique semble s'imposer :

- les divers polluants, leurs effets, les problèmes économiques qu'ils soulèvent,

- l'eutrophisation des milieux aquatiques.

L'eutrophisation est un phénomène local, ce qui rend la deuxième sous-partie tout à fait l'analogue de son homologue de la pollution atmosphérique. Par contre, nous n'avons pas pu prendre un point de vue mondial dans une troisième sous-partie ; en effet, la complexité du processus à prendre en compte et la méconnaissance que nous en avons, interdisent, pour l'instant, de se faire une idée globale de l'écologie marine, et surtout, de son évolution sous l'influence des phénomènes naturels et artificiels.

1. Les différents polluants

On peut les classer grossièrement en deux catégories :

- les corps biodégradables, que le milieu aquatique élimine progressivement, si ses possibilités ne sont pas saturées,

- les toxiques rémanents qui, par leur stabilité chimique, restent très longtemps dans le milieu.

1.1. Les hydrocarbures

Biodégradables, ils sont quelquefois rejetés accidentellement en quantité telle que le milieu peut difficilement les éliminer.

Leurs effets se groupent en trois catégories.

Les premiers sont mécaniques et s'exercent sur la flore et la faune, lorsque les hydrocarbures sont en masse suffisante, par:

(*) zone sous-marine où existe le plateau continental
(*) zone sous-marine où celui-ci n'existe plus, qui est donc plus profonde.*

- engluage des coquillages, des crustacés et des algues,

- colmatage des branchies des poissons.

Quand ils sont en couche même de très faible épaisseur (monomoléculaire à la limite), mais de grande surface, ils réduisent considérablement les échanges gazeux entre l'océan et l'atmosphère, nécessaires à la photosynthèse. Le cycle écologique est alors interrompu.

Enfin, ils présentent des effets biologiques, qui dépendent beaucoup de leur composition :

- les aromatiques sont des poisons violents, pour tous les organismes vivants ; dans le cas des poissons, les doses toxiques vont de 10 à 90 p.p.m. pour le benzène et le toluène, de 4 à 5 p.p.m. pour le naphtalène et l'anthracène,

- les paraffines sont moins toxiques, mais troublent certains mécanismes biologiques commandant les instincts fondamentaux: instinct de conservation, instinct de reproduction...,

- les oléfines manifestent une action similaire à celle des précédents.

Problème posé

La pollution par les hydrocarbures provient aussi bien de déversements systématiques, que de sources accidentelles.

a) *Les déversements systématiques* sont surtout imputables aux nombreux pétroliers, qui sont dans l'obligation de nettoyer leurs citernes après déchargement d'une cargaison, pour trois raisons :

- empêcher la corrosion par les résidus de déchargement,

- éviter l'accumulation des gaz présentant un danger d'explosion,

- préparer la réception d'une nouvelle cargaison, peut-être non compatible avec la précédente.

Les moyens techniques existent d'ores et déjà, qui permettent d'abaisser dans une large mesure cette cause de pollution. Par exemple, le procédé de "chargement sur résidus" comprend, au retour d'une livraison :

- le remplissage de certaines citernes par de l'eau de mer, pour assurer la flottabilité du navire,

- le nettoyage des autres citernes, avec stockage des résidus dans de petites citernes, dites de décantation,

- la vidange des citernes précédemment remplies, après décantation, avec stockage de la phase supérieure, qui contient les résidus, dans les citernes de décantation.

Lors d'une nouvelle livraison, le contenu des citernes de décantation sera mélangé aux citernes contenant la nouvelle cargaison pour diluer le sel apporté par l'eau de mer. La pollution résiduelle découle du rejet des phases inférieures de décantation, qui recèlent toujours un peu de pétrole. Ce procédé demande malheureusement des trajets suffisamment longs, pour être applicable. Dans le cas contraire, on peut envisager par exemple :

- le nettoyage des citernes au port de déchargement, solution coûteuse par l'investissement et les charges d'exploitation qu'elle impose,

- le traitement du contenu des citernes (résidus + eau de mer pour assurer la flottabilité) pour récupérer les résidus, au port d'embarquement.

Disposant ainsi de méthodes capables de réduire de 80 % les émissions d'hydrocarbures des pétroliers, il reste à les généraliser par l'application convenable d'une réglementation appropriée.

Les autres rejets systématiques d'hydrocarbures sont à mettre au compte des raffineries côtières et des fonds de cale de navires de tous types. La proximité de la côte rend comme les précédentes, les émissions particulièrement nuisibles. A longue échéance, les eaux résiduaires des raffineries ne devraient pas soulever trop de questions, ainsi que le montre le calcul suivant :

- des installations de traitement permettent d'abaisser à 5 p.p.m. la teneur en hydrocarbures des eaux usées,

- il faut en moyenne 6 T d'eau pour 1 T. de pétrole traitée

- pour une production annuelle par exemple de 10 milliards de T de brut, les émissions totales ne seraient guère que de l'ordre de : $5 \times 10^{-6} \times 6 \times 10 \times 10^{9}$ T = 300 000 T réparties sur l'ensemble du globe (le seul accident du Torrey Canyon en relâcha 120 000 T).

b) *Les déversements accidentels* tirent leur origine, soit d'accidents de pétroliers, soit d'éruptions soudaines de puits de pétrole. Globalement leur importance est bien moindre que celle des précédents, mais ils peuvent causer de véritables catastrophes, par la concentration en un seul point d'émissions d'ampleur parfois considérable.

Au rang des mesures préventives, se trouvent :

- la réglementation plus stricte de la circulation des navires,

- l'augmentation des mesures de sécurité prises à bord des navires, et lors des forages en mer,

- le contrôle des capacités techniques requises pour effectuer un forage dans de bonnes conditions.

La mise au point de mesures curatives bien adaptées se poursuit, dans deux directions :

- la récupération de la nappe répandue, d'autant plus facile que la couche d'hydrocarbures est plus épaisse : ceci impose une intervention rapide ; des barrages flottants peuvent protéger une zone littorale particulièrement vulnérable, ou circonscrire l'étendue de la nappe, pour en limiter l'extension et en permettre le pompage ;

- l'élimination des hydrocarbures par précipitation au fond ou dispersion au sein de l'océan, procédés qui ne sont pas malheureusement sans effet nuisible sur la faune et la flore ; néanmoins, ce sont les seuls praticables en cas de nappe trop mince.

Conclusion

Il semble donc se dégager de l'étude de ces divers cas de pollution, une image assez rassurante de l'avenir en ce domaine ; les moyens techniques actuels, en effet, autorisent à un coût raisonnable, une baisse importante des nuisances imputables aux hydrocarbures. L'effort à faire se situe dans leur utilisation généralisée.

1.2. *Les détergents*

Dans un passé recent, ces produits, qui n'étaient pas biodégradables, provoquaient des accumulations de mousse à la surface des cours d'eau ou des étendues d'eau de types divers. La législation des différents pays développés, a plus ou moins rapidement interdit (entre 1960 et 1970) les détergents non biodégradables, qui furent remplacés par de nouveaux, qui eux le sont au moins à 80 %. Nous nous intéresserons seulement à ces derniers.

Effets. Une toxicité est très variable suivant les espèces : elle est faible pour les mammifères, importante pour les mollusques et les crustacés. Les algues sont très sensibles aux détergents.

Cependant, l'impact principal ne provient pas de la partie proprement détergente de la molécule des produits employés ; celle-ci ne représente, pour une poudre à laver, que 10 à 15 % de la molécule. Le reste, adjuvant de lavage, est constitué en général de divers sels de sodium, parmi lesquels les polyphosphates jouent le rôle principal (de 50 à 75 %, en poids, de la molécule). Comme nous le verrons dans la sous-partie suivante, les sels de phosphore peuvent favoriser grandement l'eutrophisation par leurs propriétés fertilisantes. Or, à eux seuls, les détergents sont responsables de 40 à 70 % (suivant les pays) des apports de phosphore aux milieux aquatiques ; ils peuvent donc être, à ce titre, considérés comme très nuisibles.

Problème posé. Les détergents répondent à un besoin très net, domestique autant qu'industriel, de notre économie. Une première solution consisterait à supprimer leurs effets, en éliminant des effluents par un traitement approprié, le phosphore, cause principale de leur nocivité ; nous étudierons cette possibilité en même temps que tous les moyens d'épuration des eaux usées lors de l'eutrophisation. Nous allons plutôt ici attaquer le problème à sa source, en regardant successivement les moyens :

- de diminuer, en utilisant toujours les formules actuelles, la part du *triphosphate* de sodium,

- de remplacer celui-ci par des composés moins gênants,

- de substituer d'autres produits aux détergents.

a) *La simple diminution du pourcentage de triphosphate dans les formules actuelles*

La fonction du triphosphate est de combattre la dureté de l'eau, qui sinon est gênante. Répartir les eaux en trois catégories suivant cette dureté, douce, moyenne et dure, permettrait de définir une formule détergente spécialement adaptée à chaque type, qui contiendrait la quantité la plus petite possible de triphosphate. Celle-ci pourrait être abaissée à 25 % seulement de la molécule, dans le cas du produit pour eau douce. L'utilisation généralisée de cette méthode conduirait déjà à réduire de moitié les rejets de phosphore dus aux détergents.

b) *La substitution du triphosphate de sodium*

Les recherches engagées dans cette direction ont déjà mis en évidence 3 composés susceptibles de le remplacer :

- le nitrilotriacétate de sodium (N.T.A.) est aussi satisfaisant du point de vue des qualités de lavage ; par contre il est difficilement biodégradable ; il accroît le risque de pollution par les métaux lourds en les transportant par chélation sur sa molécule ; enfin, il est peut-être cancérogène, ce qui achève de le rendre sans doute plus nuisible que le triphosphate,

- les carbonates et silicates présentent de bonnes performances de lavage, mais aussi une causticité élevée en raison de leur PH fort,

- le citrate de sodium serait le plus intéressant, malgré ses moins bons résultats de lavage, parce que parfaitement biodégradable et non toxique.

c) *Le remplacement des détergents par les savons*

Juste retour des choses après leur élimination par les détergents, les savons peuvent très bien être substitués à ces derniers, partout où l'eau n'est pas trop dure. Il sont eux aussi biodégradables

et peu toxiques. Le seul point délicat provient des machines à laver existantes qui, étudiées pour l'utilisation de détergents, ne pourraient être reconverties qu'avec difficulté.

La conclusion à tirer de tout ceci paraît donc, à long terme, extrêmement favorable à la bonne résolution du problème posé par les détergents.

1.3. *Les métaux lourds*

Nous entrons ici dans la catégorie des toxiques rémanents, parmi lesquels les métaux lourds occupent une place prépondérante. Ce sont les métaux qui se situent dans la partie centrale de la classification de Mendeleïev, comme le cuivre, le chrome, l'étain, le zinc, le cadmium, le plomb et le mercure. Leur impact est rendu particulièrement dangereux par la concentration le long des chaînes trophiques qui aboutit à des coefficients multiplicatifs de cent à un million, ainsi que le montre le tableau suivant, issu du rapport du G.I.P.M. ; il donne pour 9 métaux lourds les doses :

- quotidiennes nécessaires à l'homme,
- toxiques pour l'homme,
- admissibles le long de la chaîne alimentaire marine.

LES METAUX LOURDS : DES PRODUITS MARINS AUX CONSOMMATEURS

(les valeurs exprimées dans ce tableau sont les plus fréquemment rencontrées dans les publications actuelles)

	ARSENIC	BORE	CADMIUM	CHROME	CUIVRE	MERCURE	PLOMB	SELENIUM	ZINC
dose quotidienne nécessaire à l'homme (en mg)	0,01-0,02mg				2 mg				6 - 10 mg
dose toxique pour l'homme (1)	70 mg AS^{III} sont mortels	< 100mg/j.	30 mg sont toxiques -	300 mg Cr^{VI} sont mortels	2,5 g sont mortels		< 1mg/j.		
Doses admises dans les aliments (mg/Kg)			poisson : 1 mollusque : 5	0,1	poisson : 5 mollusque : 40	poisson:0,7		3	35
Eau de mer (mg/l)	0,002-0,003	4,6	< 0,00001	0,00005	0,003-0,01	0,00003	0,00003	0,00009	0,001-0,01
Algues (mg/Kg)	0,14- 1	0,4 - 20	0,0006		1,7 - 12,4		0.5 - 9		42 - 962
Mollusques (mg/Kg)	7 - 120 (moule)	1 (moule)			60 - 900 (huître)	0,025 - 0,2	2,8 - 6 (huître)		100 - 1600 (huître)
crustacés (mg/Kg)	15 - 174 (crevette)	0,25 - 1,5 (langoustine)			20 - 90 (crevette)	0,04	0,1 - 2,3 (homard)		122 - 184 (tourteau)
poissons (mg/Kg)	2,5 - 75 (grondin)	0,20	0,15 - 3	0,02 - 1	1,5 - 6 (thon)	0,1 - 10	0,3 - 6	0,2 - 0,4	0,2 - 1200 (hareng)

Remarques : - Les doses admissibles dans les aliments sont exprimées en mg par Kg d'aliment.

- Les concentrations dans les produits marins sont toutes exprimées en mg par Kg de matière sèche.
- Chaque fois que cela a été possible, on a indiqué entre parenthèses dans quelle espèce avait été trouvée la plus forte dose.

(1) En cas d'ingestion en une seule fois.

Ils sont introduits dans l'environnement, en plus des voies naturelles (érosion de roches contenant des minerais de ces corps, volcanisme), de deux manières principales :

- soit par les eaux résiduaires de l'industrie ; dans ce cas on peut envisager l'épuration de ces dernières par des méthodes diverses (précipitation, adsorption, passage sur échangeur d'ions, attaque chimique, etc...) qui autorisent souvent l'obtention de bons résultats, à un coût, il est vrai, quelquefois élevé ; si le métal lourd incriminé ne joue pas un rôle fondamental, un changement technique peut aussi permettre de s'affranchir de son utilisation,
- soit par l'intermédiaire de biens de consommation (plomb dans les carburants, mercure dans les thermomètres, etc...) ; ils sont dans ce cas difficilement remplaçables par d'autres corps, mais toute substitution potentielle doit être examinée sans à priori.

Il ne nous est malheureusement pas possible d'entrer, pour chaque métal, dans le détail des questions soulevées. Nous nous contenterons, après avoir brièvement regardé le plomb, de nous pencher sur le cas du mercure, particulièrement aigu.

a) *Le plomb*

La teneur moyenne des océans pour ce métal, varie de 0,02 à 0,04 µg/l. Les couches supérieures des eaux de l'hémisphère-nord semblent en contenir plus, jusqu'à 0,7 µg/l, signe de pollution généralisée. En effet, du fait du turn-over déjà signalé des masses océaniques, qui nécessite, suivant les experts, de 1 000 à 10 000 ans, leur capacité gigantesque d'absorption ne peut jouer à plein, pour diluer les quelque 10 000 T de plomb rejetées annuellement (d'après une source américaine). Celles-ci proviennent pour la plus grande part des véhicules automobiles à essence, dont le problème sera étudié dans la troisième partie.

b) *Le mercure* est particulièrement préoccupant en raison des nombreux accidents de pollution où il fut mis en cause.

Effets. Le mercure est toxique aussi bien sous sa forme métallique, car il émet à température normale des vapeurs qui pénètrent les organismes par inhalation, que sous forme de sels mercuriels. Toutefois, c'est lorsqu'il se trouve dans des corps organo-métalliques, qu'il est le plus dangereux ; ainsi le mercure-méthyl ($Hg - CH_3$) provoque chez l'homme une intoxication aiguë à partir de 20 mg/kg, ce qui correspond à une ingestion quotidienne de 10 mg. Comme des recherches ont démontré la conversion par certains micro-organismes de sels mercuriels non organiques en des composés organo-mercuriels et sa réciproque, il est nécessaire de considérer avec autant de gravité, les émissions de mercure de toute nature.

Signalons pour mémoire les phénomènes de concentration qui trouvent dans le mercure un sujet de prédilection, et dont un exemple a été donné lors de l'introduction de la seconde partie.

Problème posé. Environ 10 000 T de mercure entreraient chaque année dans l'environnement, dont 60 % à mettre au compte des activités humaines. Celles-ci se répartissent en deux groupes, dont le premier est mal connu : il s'agit des combustions de tous genres, qui brûlent des combustibles fossiles contenant du mercure à l'état de traces (de 0,3 à 33 p.p.m. pour les charbons américains ; peut-être jusqu'à 20 p.p.m. pour les pétroles) ; l'importance des quantités mises en jeu conduit à 1 000 ou 2 000 T de mercure rejetées par cette voie chaque année, ce qui est considérable. L'impossibilité d'éliminer des effluents gazeux des composés d'une teneur aussi faible, obligerait à utiliser d'autres formes d'énergie, si ces émissions devenaient excessives.

Le second groupe comprend les industries utilisatrices de mercure et les produits manufacturés qui en contiennent. Ainsi la part respective de la masse totale rejetée de cette manière s'élèverait d'après N. Saito, à :

- 26 %, pour l'industrie électrolytique du chlore,
- 23 %, pour les appareils électriques,
- 12 %, pour les peintures,
- 6 %, pour les instruments de mesure,
- 3,5 %,pour l'usage catalytique dans diverses industries,
- 3,4 %,pour l'usage dentaire,
- 3,3 %,pour les produits de traitement agricole,
- 2 % , pour les usages de laboraroire,
- 0,8 %,pour les usages médicaux,
- 0,7 %,pour l'industrie du papier,
- 19,3%,pour les autres

(chiffres valables pour les USA).

Le cas des industries utilisatrices semble pouvoir évoluer assez favorablement, en raison :

- des recherches engagées pour trouver de nouveaux procédés technologiques non polluants ; ainsi les cellules à mercure de l'industrie du chlore, peuvent être remplacées par des cellules à diaphragme, parfaitement convenable pour 50 % des utilisateurs, bien qu'elles produisent de la soude moins pure,
- de l'épuration des eaux résiduaires par diverses méthodes quelquefois très performantes.

En définitive, pour juguler la pollution par le mercure, un effort apparaît nécessaire, qui ne devrait pas pour autant stériliser l'économie mondiale.

1.4. *Les biocides et les autres composés organiques rémanents*

Ce sont des substances organiques de stabilité chimique telle qu'elles ne peuvent être biodégradées facilement. Les plus importantes actuellement sont les organo-chlorés et les organo-phosphorés.

Effets. Ces deux types de corps ont une toxicité comparable et agissent sur le système nerveux. Les organo-chlorés, les plus anciens, sont particulièrement difficiles à dégrader, et peuvent présenter une durée de vie supérieure à 10 ans. Les organo-phosphorés restent en général moins longtemps dans l'environnement, bien que certains puissent persister au moins 3 ans. Ils donnent lieu à des phénomènes de concentration très dangereux,d'autant mieux que leur solubilité dans les graisses est meilleure : le D.D.T., par exemple, se trouve dans les graisses des gros mammifères marins,concentré de l'ordre d'un million de fois par rapport au milieu. Le tableau suivant compare, à ce sujet, pour un certain nombre de ces composés et pour diverses espèces :

- la dose nécessaire pour entraîner la disparition de 50 % des individus testés, appelée *"dose létale 50"* ou DL 50,

- et les doses trouvées dans ces organismes

TOXICITE DES BIOCIDES ENVERS QUELQUES ESPECES AQUATIQUES TYPES

(les valeurs données ci-dessous sont extraites des publications actuelles sur le sujet)

BIOCIDES	DL 50 en µg/Kg			Doses trouvées en µ g/Kg			DL 50 orale rat blanc (mg/kg)	D.J.A. homme µg/Kg
	poissons	crustacés	mollusques	poissons	crustacés	mollusques		
aldrine	< 20	0,6-50	25				67	0,1
chlordane	5,5	1,6-820	10				350	1
chlorthion	780-3200						880	
Co-ral	2800 18000						120	
delnav	43-42000						110	
D.D.T. D.D.E. T.D.E.	0,4-12000	1,6 - 10	9	10-19200 0,5-2500 0,3-1970	100-210 53-290 10-91	12-68 1,4-90 2-25	113	5
dieldrine	6-80	25-550	34				46	0,1
dipterex	7200 32000						630	
di-syston	320 320000						5,4	
Endrine	0,6-5 Exception Saumon 51	0,3					17,8	
guthion	320-2000						20	
α H.C.H.	32 - 152	5	360	0,6-230	51-120	0,7-12		
γ H.C.H.	30-280	0,3	450	0,65-220	88-210	2 - 36	125	12,5
heptachlore	20-230	0,9-410	30-100				100	0,5
malathion	12-25000	800-1000					1375	20
méthylparathion	860-12000						28	
O.M.P.A.	56 1000000						10	
Parathion	68-3000		1000				13	5
sevin	5000 6000	5,5-550						
systox	110 13000						6,2	

Problème posé. Ces substances se répartissent en deux catégories, suivant leur finalité : la fonction des biocides est d'éliminer les insectes et les autres espèces qui sont gênantes pour l'homme et ses activités, parmi lesquelles l'agriculture et l'élevage sont de ce point de vue les principales. Les polychlorobiphényles (PCB) manifestent un rôle beaucoup plus industriel en raison de leurs propriétés particulières : ininflammabilité, haut coefficient diélectrique, pouvoir plastifiant, bonne stabilité thermique, bas prix ; ils entrent dans la composition des peintures et des plastiques, et servent d'isolants, par exemple comme fluide de refroidissement des gros transformateurs.

Ces derniers posent sans doute le problème le moins grave. On peut en effet distinguer, suivant leur usage :

- l'utilisation en système clos, pour laquelle ils sont enfermés et ne peuvent être relâchés dans l'environnement qu'après destruction du système ; on peut alors très bien imaginer leur récupération, dans le cas de système de taille importante comme les gros transformateurs, les condensateurs de correction du facteur de puissance ; les petits systèmes ne se prêtent malheureusement pas à une telle possibilité, et rentreraient plutôt dans la catégorie suivante ;

- l'utilisation dispersive qui interdit leur recyclage, comme c'est le cas lorsqu'ils interviennent dans les petits systèmes fermés, les peintures, les encres, les mastics, les huiles de coupe, etc... ; il s'agit donc, à chaque fois, de trouver des corps qui leur soient substituables, en vue de l'application particulière qui en est faite ; certains remplacements sont déjà possibles, en nombre insuffisant, malheureusement.

La production mondiale des PCB commencerait à décroître depuis 1971, d'après certaines sources, preuve de leur élimination progressive des usages précédents.

Les pesticides et autres biocides ne servent, eux, qu'à des utilisations dispersives et remplissent une fonction absolument nécessaire à la survie de l'humanité. Une tâche de recherche très importante devra être effectuée pour trouver une solution de remplacement :

- soit par d'autres produits chimiques,
- soit par voie biologique.

Il semble donc, en conclusion, que les pesticides soulèvent la question la plus grave que nous ayons rencontrée jusqu'alors.

1.5. *Divers*

Pour compléter ce bref tableau des pollutions générales des milieux aquatiques, il faudrait mentionner :

- les matières organiques, dont le problème sera abordé lors de l'eutrophisation,

- les rejets thermiques qui seront traités dans la troisième partie, avec la production d'électricité,

- un certain nombre de sujets que nous n'avons pu aborder en raison de leur spécificité, comme les substances radioactives.

2. L'eutrophisation des milieux aquatiques

C'est un phénomène qui se produit au sein de masses d'eau peu ou pas remuées, telles que : lacs, réservoirs, étendues d'eau côtières semi-fermées, canaux, cours d'eau lents. Il se caractérise par :

- la production accélérée des algues et des plantes aquatiques,
- la désoxygénation progressive des eaux,
- la détérioration de la qualité générale des eaux et de leur potentiel piscicole.

Les conséquences de tous ordres de ce processus sont en général considérées comme nuisibles, car ont alors lieu :

- la réduction de la valeur écologique et recréative des masses d'eau concernées,
- la détérioration de la pêche et des ressources en eau potable.

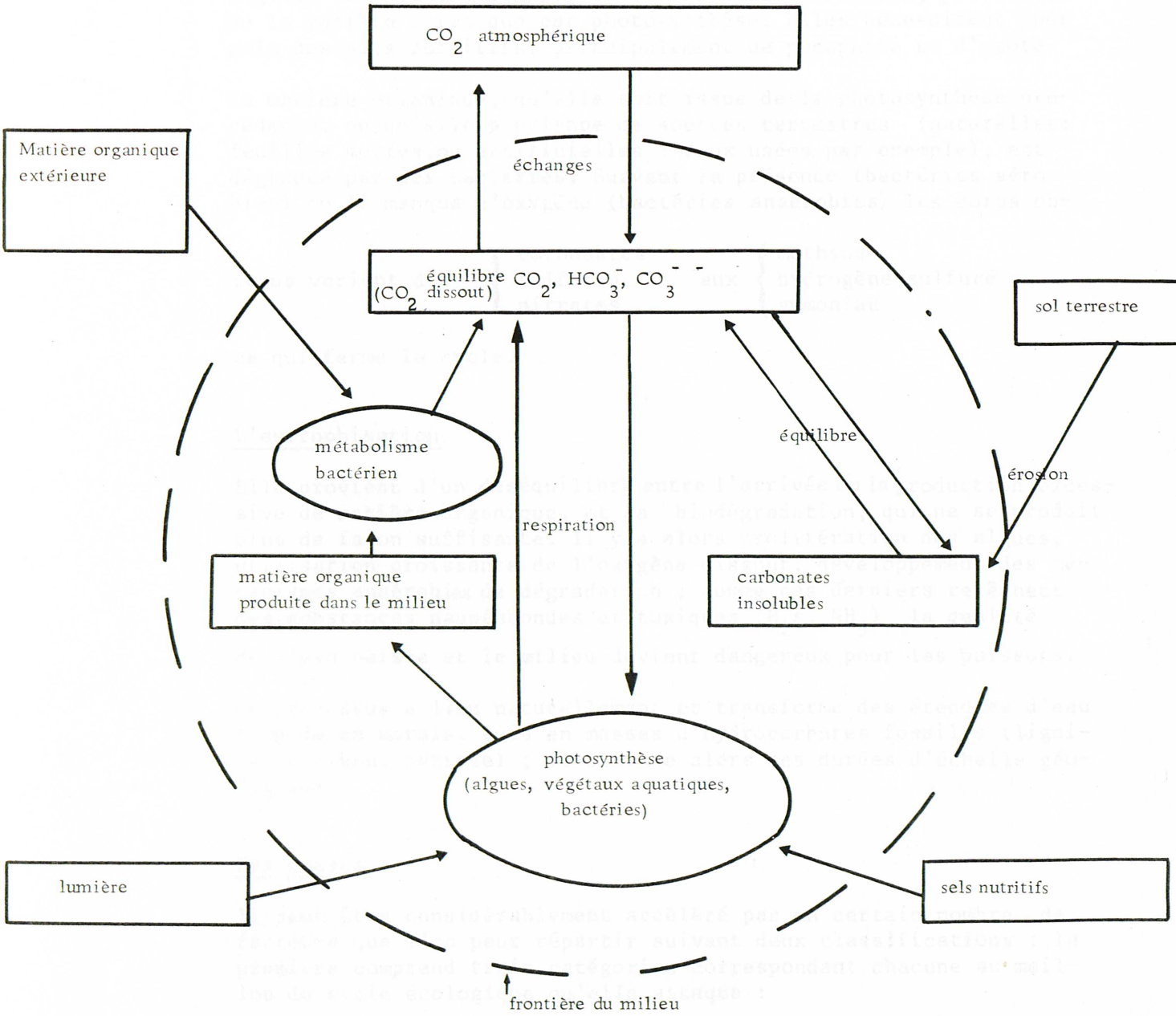
Néanmoins, l'eutrophisation peut dans certains cas constituer le moyen d'atteindre un objectif bien déterminé. Ainsi, un lac, lorsqu'il est en voie d'eutrophisation, du fait de l'accélération des cycles écologiques, permet d'obtenir une quantité bien plus considérable de protéines qui, en contrepartie, se présentent sous une forme malheureusement moins noble. Ceci a conduit certains pays, peu propices à l'élevage, qui ne disposent pas d'un accès aisé à la mer, à utiliser l'eutrophisation pour produire à bon marché des substituts de la viande ou du poisson ; ces derniers constituent une excellente matière première pour l'élaboration d'aliments du bétail. L'eutrophisation est donc un très bon exemple de phénomènes qui peuvent être considérés, suivant le but poursuivi, soit utiles, soit polluants.

Cette sous-partie sera d'abord consacrée à l'étude très succincte des cycles écologiques en milieu aquatique, et des causes qui peuvent les faire dégénérer en eutrophisation. Puis viendra un exposé des actions possibles ou seulement imaginables, car le sujet est loin d'être défriché actuellement, autorisant la stabilisation, voire la restauration des masses d'eau en voie d'eutrophisation.

2.1. *Les causes de l'eutrophisation*

Les mécanismes écologiques

Le schéma suivant décrit le cycle du carbone en milieu aquatique.



Légende

substance intervenant

mécanisme

Cycle du carbone dans l'écosystème aquatique

(d'après Goldman, Porcella, Midlebrooks et Toerien)

A partir des carbonates dissouts dans l'eau, en équilibre avec le gaz carbonique atmosphérique et les carbonates insolubles, les algues, les plantes aquatiques et certaines bactéries, produisent de la matière organique par photosynthèse. Elles nécessitent pour cela des sels nutritifs, principalement de phosphore et d'azote.

La matière organique, qu'elle soit issue de la photosynthèse précédente, ou qu'elle provienne de sources terrestres (naturelles: feuilles mortes, ou artificielles : eaux usées par exemple), est dégradée par des bactéries. Suivant la présence (bactéries aérobies) ou le manque d'oxygène (bactéries anaérobies) les corps obtenus varient des { carbonates, sulfates, nitrates } aux { méthane, hydrogène sulfuré, ammoniac } ce qui ferme le cycle.

L'eutrophisation

Elle provient d'un déséquilibre entre l'arrivée ou la production excessive de matière organique, et sa biodégradation, qui ne se produit plus de façon suffisante. Il y a alors prolifération des algues, utilisation croissante de l'oxygène dissout, développement des mécanismes anaérobies de dégradation ; comme ces derniers relâchent des substances nauséabondes et toxiques (H_2s, NH_3) la qualité de l'eau baisse et le milieu devient dangereux pour les poissons.

Ce processus a lieu naturellement et transforme des étendues d'eau limpide en marais, puis en masses d'hydrocarbures fossiles (lignite, charbon, pétrole) ; il demande alors des durées d'échelle géologique.

Ses causes

Il peut être considérablement accéléré par un certain nombre de facteurs que l'on peut répartir suivant deux classifications : la première comprend trois catégories correspondant chacune au maillon du cycle écologique qu'elle attaque :

- les arrivées de matière organique,
- les arrivées de fertilisants minéraux (surtout sels de phosphore et d'azote) qui favorisent un développement de la photosynthèse,
- les rejets de polluants qui, en détruisant certaines bactéries, amoindrissent la capacité de biodégradation du milieu ;

la seconde en comprend deux et oppose causes naturelles et artificielles.

Nous avons retenu la seconde, avec une subdivision suivant la première pour présenter tous les facteurs de l'eutrophisation.

a) Sources naturelles

Le lessivage et l'érosion des sols sont susceptibles d'apporter aussi bien des déchets organiques que des sels nutritifs minéraux.

Les animaux et l'homme lui-même rejettent des substances des deux types dans leurs excréments véhiculés par les eaux usées.

b) Sources artificielles

Les rejets domestiques (eaux usées) contiennent par l'intermédiaire des détergents beaucoup de phosphates.

L'agriculture utilise des engrais qui sont drainés pour une partie, vers des étendues d'eau où ils servent alors de fertilisants.

L'industrie rejette des corps de tout type. Les plus polluants à ce point de vue sont les industries alimentaires (sucre, amidon, produits laitiers), textiles et du bois (cellulose).

Le tableau suivant donne les contributions respectives aux rejets azotés et phosphorés :

Source	Pourcentage du phosphore total rejeté	Pourcentage de l'azote total rejeté
Egouts (détergents, urine)	60 à 70 %	30 à 40 %
Agriculture	20 à 30 %	50 à 60 %
Industrie	10 à 20 %	10 à 20 %

2.2. *Les remèdes à l'eutrophisation*

La stabilisation par l'arrêt des apports

Une première méthode consiste à supprimer des usages courants une substance incriminée : ainsi le remplacement des détergents polyphosphatés, de la manière que nous avons vu lors de la sous-partie relative aux divers polluants, est apte à diminuer de beaucoup les apports de phosphore.

Une autre approche comporte la collecte des eaux usées qui sont ensuite, avant d'être rejetées, amenées à une usine d'épuration ; celle-ci, spécialement adaptée au cas particulier des eaux à traiter, élimine les matières organiques, les sels nutritifs minéraux et les polluants qui abaissent la capacité d'absorption du milieu. Le traitement comprend un certain nombre de phases :

- dans la première les matières en suspension (organiques en général), sont retenues par des procédés physiques classiques;

- la seconde dégrade par voie biologique les matières organiques dissoutes, grâce aux micro-organismes contenus par des lits bactériens ou des boues activées ;

- la troisième, chimique, arrête les sels minéraux fertilisants, principalement de phosphore et d'azote ; les phosphates sont facilement éliminés par précipitation de composés insolubles formés avec le calcium, le fer ou l'aluminium ; le cas des nitrates et des composés ammoniacaux est plus délicat et non encore au point : on peut par exemple imaginer un premier processus aérobie biologique d'oxydation des sels ammoniacaux en nitrates, puis un second anaérobie, de réduction des nitrates à l'état d'azote élémentaire ;

- dans la quatrième les germes pathogènes sont éliminés, par chloration, par exemple.

La part la plus importante des investissements se trouve souvent être l'égout collecteur. Ainsi le programme d'épuration des rejets dans le lac d'Annecy a compris :

- une canalisation faisant le tour du lac pour : 46 millions F
- des stations de pompage pour ..... : 4 " "
- une usine de traitement pour ..... : 4,5 " "

Pour les rejets en mer on peut souvent se contenter d'éloigner de la côte le point d'émission ; les corps rejetés se mélangent alors à un plus grand volume d'eau, dont la capacité d'absorption est plus importante.

La restauration de la qualité primitive

Dans beaucoup de cas, l'arrêt des apports fertilisants, s'il est nécessaire, ne suffit pas à stopper l'eutrophisation. A partir d'un certain stade, les substances nutritives contenues dans les sédiments déposés au fond des étendues d'eau peuvent être utilisées comme telles, et sont susceptibles, à elles seules, d'alimenter le processus. Aussi tout procédé de récupération consistera à arrêter les échanges entre le milieu et les sédiments. On peut imaginer, par exemple :

- de draguer et pomper les vases, qui seront rejetées après élimination par traitement des sels nutritifs,

- de déposer sur le fond une couche interdisant tout échange (de la brique pilée par exemple),

- de ramener au contact de l'eau les sédiments profonds, en général peu fertilisants, qui jouent le rôle de la couche précédente (en utilisant des explosifs,par exemple).

Beaucoup d'autres méthodes sont à priori pensables. Le choix de la meilleure dépend considérablement des conditions particulières dans lesquelles se trouve l'étendue d'eau à restaurer. Ainsi dans

le cas du lac de Nantua, on a proposé l'installation d'un simple paravent, de proportions énormes bien sûr ; en arrêtant le vent d'ouest dominant, il interdirait la formation du courant (vers l'ouest en surface, vers l'est au fond) qui actuellement brasse les eaux du lac et favorise leurs échanges avec les dépôts sédimentaires.

D'une façon générale, les recherches commencent à peine dans cette voie et les seules expériences mondiales, faites sur des lacs Suisse et Suédois,sont peu concluantes en raison de leur faible profondeur. Il apparaît cependant dès maintenant certain, que la restauration de la qualité originelle d'un lac partiellement eutrophié sera très coûteuse, et ne se justifiera de nombreuses fois que si l'on attache vraiment un grand prix aux qualités esthétique et récréative.

CONCLUSION

A condition de sacrifier les cas les plus avancés d'eutrophisation, il semble possible, en faisant porter l'effort sur l'arrêt des rejets de substances eutrophisantes,de concilier la bonne marche de notre économie avec le ralentissement de la dégradation que subit actuellement notre environnement aquatique. Dans cette optique, paraissent condamnés des mers comme la Baltique ou la mer du Nord, et des lacs comme certains Grands Lacs américains.

IIIème PARTIE

PROBLEMES GLOBAUX

Parmi tous les facteurs sur lesquels repose actuellement l'économie humaine, il en est deux particulièrement fondamentaux : les besoins de transport et d'énergie, qui sont satisfaits pour une large part, respectivement, par les véhicules automobiles et l'électricité. C'est pourquoi il nous a paru intéressant de regrouper tous les problèmes importants que la pollution peut soulever autour de ces questions.

1. Le besoin de transport et la circulation automobile

Les moteurs utilisés sur les véhicules actuels émettent des substances polluantes : on en a identifié jusqu'à deux cents. Néanmoins, les quantités mises en jeu sont suffisamment faibles pour n'être préoccupantes qu'en zone urbaine où la densité du trafic est importante.

Nous regarderons successivement :

- les polluants émis,
- les améliorations que l'on peut apporter au moteur à explosion classique,
- les moteurs pouvant le remplacer dans les années à venir,
- quelques solutions partielles qui ont été envisagées,
- la conclusion que l'on peut tirer de l'étude précédente.

1.1. *Les polluants émis*

Quatre organes concourent au rejet de polluants, sur un moteur sans dispositif particulier :

- l'échappement, *pour 65 %*
- le reniflard du carter, *pour 20 %*
  qui relâche les gaz que les segments des pistons ont laissé passer
- le réservoir d'essence, *pour 6 %*
- le carburateur, *pour 9 %*
  ces deux derniers laissant échapper les hydrocarbures par évaporation.

Le tableau suivant donne les quantités de polluants rejetés pour un litre de carburant, par les véhicules diesel et les véhicules à essence ; ensuite est figuré ce qu'une voiture moyenne à essence émet pour chaque kilomètre parcouru.

Polluant	Véhicules diesel: quantités émises pour 1 l.	Véhicules à essence: quantités émises pour :	
		1 l.	1 km en moyenne
Oxyde de carbone	20 g	350 g	46 g
Hydrocarbures	39 g	50 g	2,3 g
Oxydes d'azote	23 g	17 g	2,2 g
Corps contenant du plomb	0 g	0,6 g	0,035 g
Particules solides	8 g	1,5 g	0,08 g
Anhydride sulfureux	0,6 g	0,6 g	0,035 g

Le plomb se présente surtout sous forme de composés minéraux solides (Pb O, Pb Cl_2, Pb Br_2, Pb SO_4, Pb $(PO_4)_2$) mais aussi à l'état gazeux de composés organiques imbrûlés (Pb $(C_6H_5)_4$, Pb $(CH_3)_4$).

La taille des particules va de 0,1 à 10 microns, mais 90 % sont plus petites que 2 microns.

Les effets de ces différents polluants ont été succinctement décrits dans la partie relative à la pollution atmosphérique. Rappelons seulement que le plomb, toxique à forte dose, n'a jamais eu, aux teneurs imputables aux moteurs à explosion, d'incidence métabolique constatée sur l'homme ou les animaux, à court ou à long terme.

On peut constater que le moteur diesel (bien réglé !) est de beaucoup moins polluant que le moteur à essence.

1.2. *Améliorations à apporter au moteur à explosion classique*

Les gaz de carters sont facilement recyclés grâce à une tubulure mettant en communication le reniflard et la prise d'air du carburateur. Ce dispositif est d'ailleurs obligatoire dans les principaux pays développés (U.S.A., France...).

Les fuites d'hydrocarbures, au niveau du réservoir et du carburateur, peuvent être absorbées à l'arrêt par un filtre à charbon actif, régénéré par une circulation d'air quand le moteur fonctionne.

Les gaz d'échappement posent un problème beaucoup plus complexe à résoudre :

- l'oxyde de carbone et les hydrocarbures peuvent être brûlés dans

un système de post-combustion grâce à un excès d'air qu'une pompe fournit, ou oxydés par catalyse,

- les oxydes d'azote doivent,eux, être réduits dans un pot catalytique,

- le plomb pourrait être, à concurrence de 70 %, retenu par un silencieux de type spécial ou un cyclone ; la quantité résiduelle suffirait malheureusement à empoisonner les deux catalyseurs précédents. Ceci impose l'utilisation d'essence sans plomb, que la pollution par ce seul corps ne nécessiterait pas.

Examinons plus précisément ce dernier point. Le plomb tetraethyl ou tetramethyl, inhibiteur de détonation,sert comme additif à augmenter l'indice d'octane de l'essence. Ne plus l'utiliser, implique de fabriquer des moteurs à plus bas taux de compression, donc à plus mauvais rendement : la consommation sera augmentée de 5 à 10 %, à puissance égale. De plus les carburants devront contenir plus de composés aromatiques et aliphatiques à chaîne ramifiée, pour ne pas avoir un indice d'octane trop bas : brûlant plus mal, ils provoquent un accroissement des émissions d'hydrocarbures très fortement cancérogènes, comme le benzopyrène. Signalons un phénomène annexe, dû à l'absence de plomb : les sièges de soupapes,qui ne sont plus lubrifiés par le plomb, présentent une usure deux à trois fois plus rapide. Ce dernier fait empêche de supprimer totalement le plomb des essences dans un délai court.

En résumé, un moteur peu polluant sera à bas taux de compression; les sièges de ses soupapes seront faits d'un alliage particulièrement résistant. Les gaz d'échappement seront soumis à une double catalyse. Nous avons regroupé dans deux tableaux et un graphique, des estimations plus précises quantitatives des progrès que l'on peut attendre. On trouvera :

- dans le premier tableau, pour la France, les performances d'épuration, le coût et la date de production en grande série des divers procédés prévus,

- dans le second, d'origine américaine, tout au long de la décennie 1967-77, le coût des améliorations envisagées aux U.S.A.,

- sur le graphique, la charge à consentir (en dollars) représentée en fonction de la part, que l'on veut éliminer, de la pollution globale émise par un véhicule à essence .

Coût probable en France de systèmes différents pour réduire les émissions

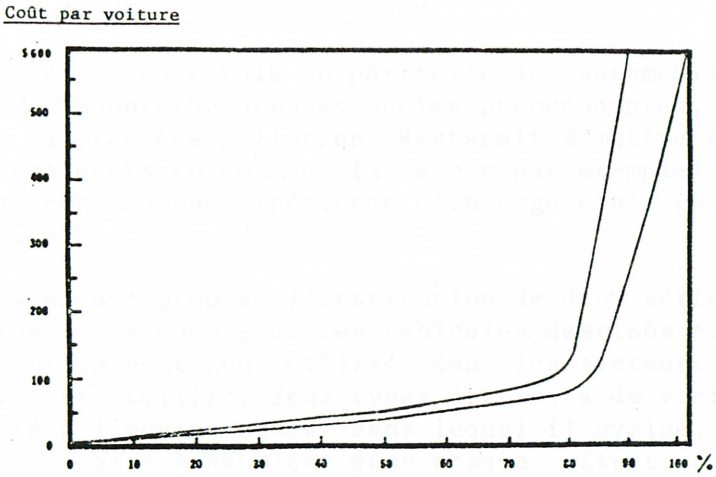
Moteur	Pollution par rapport à une voiture "Europe 1972" à essence	Coût par voiture moyenne à l'achat	Coût d'usage	Délai possible grande série
Post-combustion	CO : - 40 % HC : - 40 % NO : peu changé	+ 6 à 8 %	+ 10 à 20 % d'essence	1976 à 1980
Double-catalyse	CO : - 40 % HC : - 40 % NO : - 70 à 80 %	10 %	+ 10 à 25 % d'essence renouvellement des catalyseurs ?	après 1980
Recirculation des gaz d'échappement	CO : - inchangé HC : - inchangé NO : - 30 à 50 %	+ 1 %	inchangé	1976 à 1980
Amélioration du diesel (odeur, fumées)	CO : - 90 % HC : - 50 % NO : - inchangé	+ 5 à 10 %	Reste économique	1975 à 1985
Moteur à gaz	Réglage pauvre : CO : - 80 % HC : inchangé NO : - 30 à 50 %	+ 3 à 13 %	Politique fiscale pour le carburant	1976 à 1980
Charge stratifiée	Peu de gain attendu	+ 3 à 6 %	?	

Techniques de réduction des émissions de polluants
par les sources à moteur mobiles
et coûts d'investissement prévus : 1967 à 1977

Model Year	Autos and Light Duty Trucks Typical Changes or Controls Added	Additional Cost Per New Vehicle (dollars)	Total Cost per Vehicle (Cumulative) (dollars)
1967	None	0.00	0.00
1968-1969	Closed PCV system (above cost of open system) Carburetor changes Ignition timing changes Inlet air temperature control	5.40	5.40
1970	Additional carburetor changes Idle control solenoid Ignition timing changes	7.40	12.80
1971	Evaporative emission control Improved idle control solenoid with overheat protection (above '68-'70 costs) including transmission spark control Low compression ratios Additional carburetor changes	19.70	32.50
1972	Valve and valve seat changes for unleaded gasoline	2.00	34.50
1973-1974	Exhaust gas recirculation for NO_x control Speed controlled spark timing	48.00	82.50
Cum 1974			82.50
1975	Catalytic oxidation of exhaust HC and CO (includes long-life exhaust system) Utilized ignition systems for 50,000 mile service-free performance Air injection for catalytic unit needs	168.00	246.50
1976-1977	Dual catalyst units for HC, CO, and NO_x or tandem NO_x and CO-HC catalytic units (above the cost for HC and CO only) Modified manifold reactors to reduce catalyst load	105.00	351.50
1975	Extremely lean fuel mixtures (unitized) electronic ignition with electronic control of spark timing as previously) Electromechanical fuel injection Special valves and intake design	125.00	207.50
1976-1977	Low temperature NO_x decomposition catalyst unit (cost above controls supplanted such as exhaust gas recirculation)	85.00	292.50
Cum 1974			82.50
1975	Catalytic oxidation of exhaust HC and CO Air injection to assist catalytic unit	133.00	215.50
1976-1977	Exhaust gas recirculation increased to maximum for NO_x control. Modulation of recirculation. (Additional cost above previous simpler system.)	14.00	229.50

Source : "The Economics of Clean Air" (draft), Research Triangle Institute, September 1971, Chapter 3, pp. 3-15 and 3-16.

Coût probable par voiture pour réduire
les émissions de polluants



Source : D'après des évaluations privées des constructeurs, préparé par le Département du Commerce.
"Development of Systems to Attain Established Motor Vehicle and Engine Emission Standards", présenté au Congrès par l'Administrateur de l'Agence pour la Protection de l'Environnement, septembre 1971, p. 6-4.

1.3. *Moteurs susceptibles de remplacer le moteur à explosion classique*

Le moteur Wankel qui en est une variante rotative, se prêterait plus facilement à la post-combustion des gaz d'échappement, plus chauds que dans le cas du moteur classique. Pour le reste, rien n'est changé.

Les moteurs à combustion externe sont très peu polluants, en raison des bonnes conditions dans lesquelles se produit la combustion. Ils présentent des inconvénients d'un autre ordre :

- le moteur à vapeur est peu nerveux et demande avant d'être mis en route un temps de chauffage non négligeable ; il semble très bien convenir au transport en commun,

- le moteur stirling, très silencieux (pas de soupapes) nécessite un préchauffage, avant d'être mis en route ; il est beaucoup plus volumineux et compliqué que le moteur à explosion, mais pourrait le remplacer au prix d'une dépense sensible.

Le moteur électrique constitue le plus grand espoir, à condition de mettre au point une source d'énergie électrique transportable et pas trop chère. Les recherches entreprises sur les piles à combustible devraient déboucher économiquement entre 1980 et 1990 ; les accumulateurs paraissent donner plus de problèmes. Cette voie est la moins polluante.

D'une façon générale, changer de technologie sera très coûteux pour

la collectivité et demandera un délai important en raison de la durée de vie des investissements de la technique actuelle.

1.4. *Autres solutions envisageables*

La suppression totale ou partielle des automobiles particulières, dans les zones urbaines, les seules préoccupantes, résoudrait évidemment le problème pollution. Resterait à mettre en place un réseau de transports en commun (à vapeur par exemple) capable de les remplacer. Aucune expérience d'envergure n'a encore été tentée de ce côté.

Certains ont proposé l'institution de deux séries de normes différentes : les unes pour les véhicules destinés au milieu urbain, les autres pour ceux utilisés dans les secteurs à faible niveau de pollution. Utiliser deux types distincts de véhicules, chacun bien adapté à l'environnement dans lequel il évolue, semble retenir le moyen le plus économique dans chaque situation. On se heurterait en pratique à de nombreuses difficultés : contrôle des véhicules en zone urbaine, impossibilité pour les ruraux de se rendre en voiture dans les villes, coût élevé pour les constructeurs d'avoir à fabriquer des modèles répondant à des normes différentes.

On a été jusqu'à envisager des moyens qui procèdent plus du "système D" que d'une étude logique de la question, pour diminuer le besoin de transport individuel, partant le trafic et la pollution:

- pour favoriser l'utilisation collective des voitures le péage de Bay Bridge a été réduit pour les automobiles avec plus d'une personne à bord, à San Francisco,
- l'étalement des heures de travail ferait disparaître la pointe quotidienne de pollution,
- la semaine de 4 jours diminuerait d'un cinquième la pollution due aux déplacements de travail.

Aucune de ces méthodes n'attaque bien profondément le problème, malheureusement.

1.5. *Conclusion*

Aussi aiguë que se présente actuellement la pollution automobile, elle ne semble pas très inquiétante dans une perspective à long terme. La diversité des solutions techniques prometteuses, ainsi que la possibilité de remplacer le trafic particulier en milieu urbain par des transports en commun appropriés, permet de penser virtuellement résolue la question qu'elle pose. Si l'on peut donc distinguerle but lointain vers lequel se diriger, on ne voit guère, par contre, qui mettra en oeuvre de sa propre initiative, les moyens coûteux de l'atteindre. Une fois de plus en matière de pollution, le rôle des pouvoirs publics paraît devoir être prépondérant.

2. La production d'électricité

Un certain nombre de techniques permettent présentement de produire économiquement de l'électricité. D'autres sont en gestation et semblent quelquefois très prometteuses. Nous passerons tous ces procédés rapidement en revue en indiquant les nuisances qui leur sont imputables. Nous examinerons ensuite plus précisément le problème le plus inquiétant, celui des rejets thermiques.

2.1. *Techniques de production*

Les procédés employés actuellement sont au nombre de trois :

- *les centrales hydroélectriques* qui ne sont pas polluantes, mais dont les sites potentiels ont été pour une très large part utilisés, tout au moins dans les pays développés,

- *les centrales thermiques* à combustible fossile ; elles rejettent une quantité de chaleur de l'ordre de l'énergie électrique produite, du fait de leur rendement limité par le théorème de Carnot. Elles émettent en plus du gaz carbonique, divers polluants, surtout de l'anhydride sulfureux et des poussières contre lesquels on peut prendre les mesures qui ont été décrites dans la première partie,

- *les centrales nucléaires* utilisant la fission ; en plus de déchets radioactifs, dans le problème desquels nous ne rentrerons pas, elles rejettent de la chaleur : une quantité de l'ordre du double de l'énergie électrique obtenue pour les filières utilisées couramment actuellement qui ne sont pas à haute température.

Les centrales électriques installées dans les prochaines années seront surtout des deux derniers types. Seul un effet nuisible des émissions de gaz carbonique sur le climat pourrait condamner le deuxième procédé : en effet, comme nous l'avons vu dans la première partie, les difficultés soulevées par les autres polluants peuvent être résolues, à un coût il est vrai non négligeable. De toute façon nous sommes assurés par le moyen des centrales nucléaires de pouvoir soutenir le rythme de croissance actuel de la production d'électricité, sous la réserve de trouver une bonne méthode d'évacuation de la chaleur.

Pour un avenir plus lointain, les recherches sont engagées dans plusieurs voies :

- *récupération de l' "énergie terrestre"* : énergie marémotrice, de la foudre, des tremblements de terre, etc... (à l'exclusion de l'énergie géothermique). Sa valeur totale, selon les estimations habituelles, serait de l'ordre de ce que l'humanité produit actuellement (d'après R. Gibrat). On ne peut donc guère compter sur son exploitation pour assurer la croissance à long terme de notre économie,

- utilisation de *l'énergie géothermique* ; elle consiste à capter les flux de vapeur ou d'eau très chaude par sondage au sein de

Une élévation par trop importante de la température du milieu pourrait avoir pour conséquences :

- l'appauvrissement du milieu en oxygène, corps nécessaire à la dégradation des polluants organiques,

- la réactivation de boues et le développement de micro-organismes nuisibles,

- la mort des poissons qui ont besoin d'une température comprise entre des bornes bien définies : 26 ° C, est la limite supérieure pour la truite, par exemple.

Toutefois, si le milieu est pollué au point de ne presque plus contenir d'oxygène, le brassage résultant du passage de l'eau dans le circuit de refroidissement de la centrale l'enrichit en oxygène, au lieu de l'appauvrir : l'effet est alors, de ce point de vue, bénéfique. Par ailleurs, le rejet se mélange en général mal avec l'eau du milieu extérieur : ce phénomène oblige à regarder l'élévation de température de façon détaillée et à ne pas se contenter d'une mesure globale.

Cette méthode impose à la puissance de la centrale, pour unique contrainte, la capacité d'absorption thermique du site.

b) Voie humide : méthode de circuit fermé

Le fluide de transfert (l'eau) décrit ici un cycle : la vapeur détendue lui cède de la chaleur qu'il rejette dans l'atmosphère grâce à un échangeur nommé *réfrigérant atmosphérique* ; il retourne ensuite pour un nouveau cycle au condenseur. L'eau et l'air sont en contact direct au sein du réfrigérant atmosphérique, ce qui favorise le transfert de chaleur, mais facilite l'évaporation; celle-ci se traduit par une perte d'eau de 1,2 à 1,8 % du débit circulant dans le circuit de refroidissement. Les sels dissouts se concentreraient indéfiniment, si l'on se contentait de faire l'appoint de l'eau manquante : il y a obligation de purger continuellement le circuit de refroidissement, donc de se trouver près d'une source suffisamment abondante d'eau.

Le réfrigérant atmosphérique est constitué d'une ou plusieurs grandes tours en forme d'hyperboloïde de révolution, qui peuvent dépasser cent mètres de haut. La pollution esthétique est alors loin d'être négligeable. L'emploi de puissants ventilateurs permet de réduire leur taille de moitié ou des deux tiers, au prix d'une pollution sonore, cette fois, importante (des phénomènes d'ondes stationnaires s'établissent, qui sont particulièrement désagréables). L'augmentation de l'humidité de l'air, entraînée par l'évaporation, peut accroître la nébulosité locale, ce qui en zone urbaine est propice, nous l'avons vu, à l'établissement d'inversions de température ; celles-ci peuvent, en sens contraire, être brisées par la chaleur dégagée : seule une étude tenant compte des conditions locales peut évaluer l'impact réel des réfrigérants atmosphériques sur le climat.

Cette solution, par elle-même, ne limite pas plus que la précédente, la puissance de la centrale. Elle ne peut, de même, s'affranchir du manque d'eau, mais ne nécessite qu'un faible débit (pour un cours d'eau) ou une petite étendue (pour un lac).

c) Voie sèche : méthode de l'aérocondenseur

La chaleur est cette fois directement cédée à l'atmosphère par la vapeur détendue au niveau du condenseur qui s'appelle donc ici aérocondenseur. Sa taille est très importante car l'échange thermique se fait avec un mauvais coefficient, au travers de tuyaux métalliques nécessités par la séparation obligatoire de la vapeur et de l'atmosphère. Avoir à transporter des quantités considérables d'eau en phase vapeur sous faible pression, impose des tuyauteries énormes, et interdit de construire des centrales de grande puissance.

Ce procédé a pour unique conséquence l'augmentation locale de la température atmosphérique, ce qui peut avoir des effets aussi bien bénéfiques que nuisibles, ainsi que nous l'avons vu dans la partie relative aux modifications locales du climat par l'industrialisation (I, 2.2.). Une fois rempli, il n'a pas besoin d'un approvisionnement ultérieur en eau.

d) Voie sèche : méthode de l'aéroréfrigérant

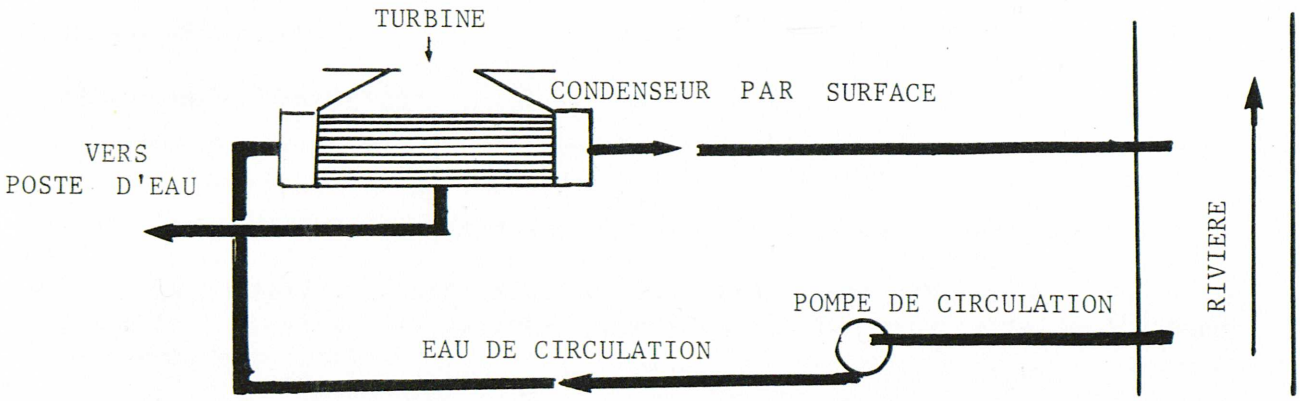
L'eau suit ici deux circuits qui s'interpénètrent au niveau du condenseur : l'un est le circuit normal de la vapeur, l'autre un circuit de refroidissement qui passe par l'aéroréfrigérant. C'est une simple variante de la méthode précédente, qui a pour but de remplacer la vapeur qui traversait l'aérocondenseur par de l'eau liquide de transport plus facile. Elle ne limite plus la puissance de la centrale, mais présente néanmoins des inconvénients :

- la surface d'échange thermique est toujours importante,

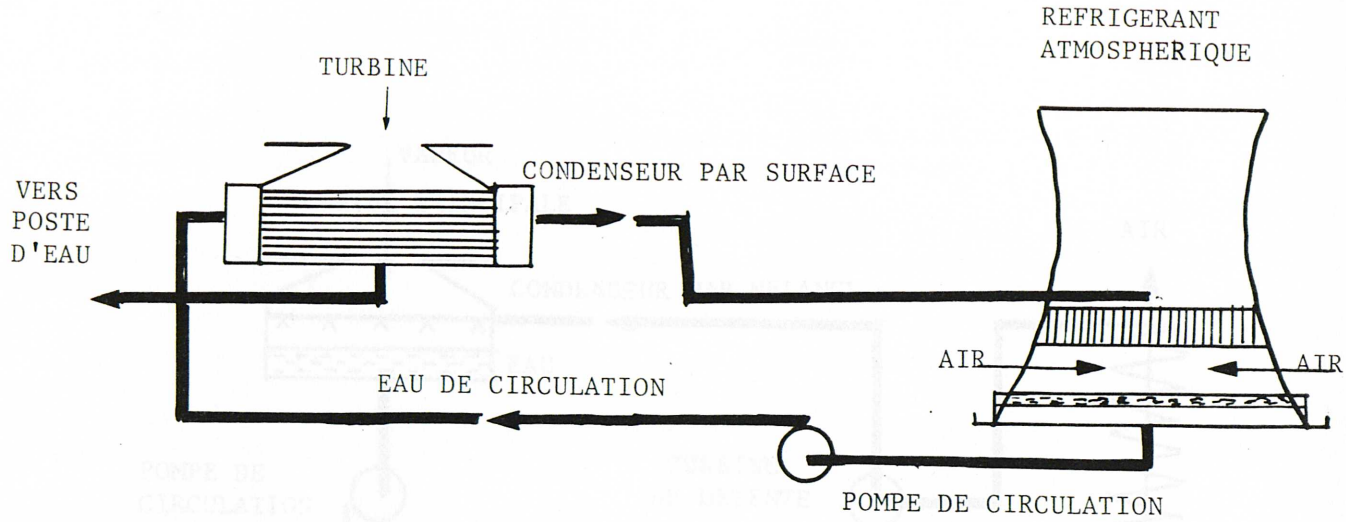
- de la puissance est consommée pour faire circuler l'eau de refroidissement.

Ce procédé présente la même nuisance que le précédent : l'échauffement local de l'atmosphère, et pas plus que lui ne nécessite une source d'eau après le remplissage initial.

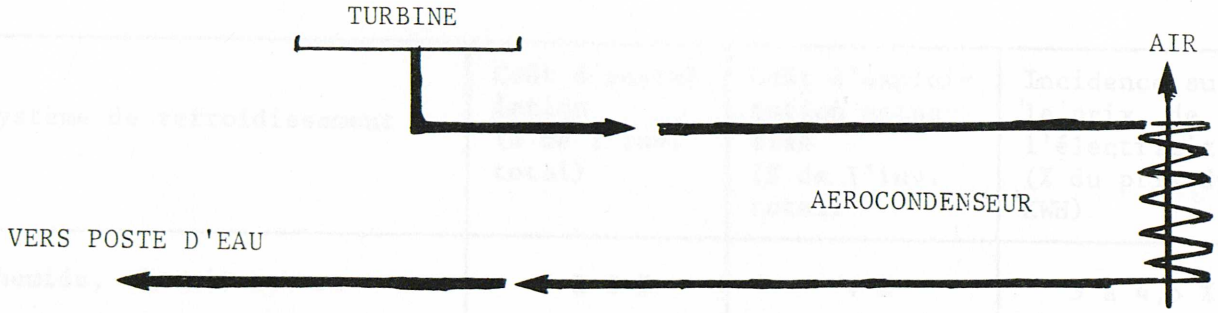
Le circuit ouvert



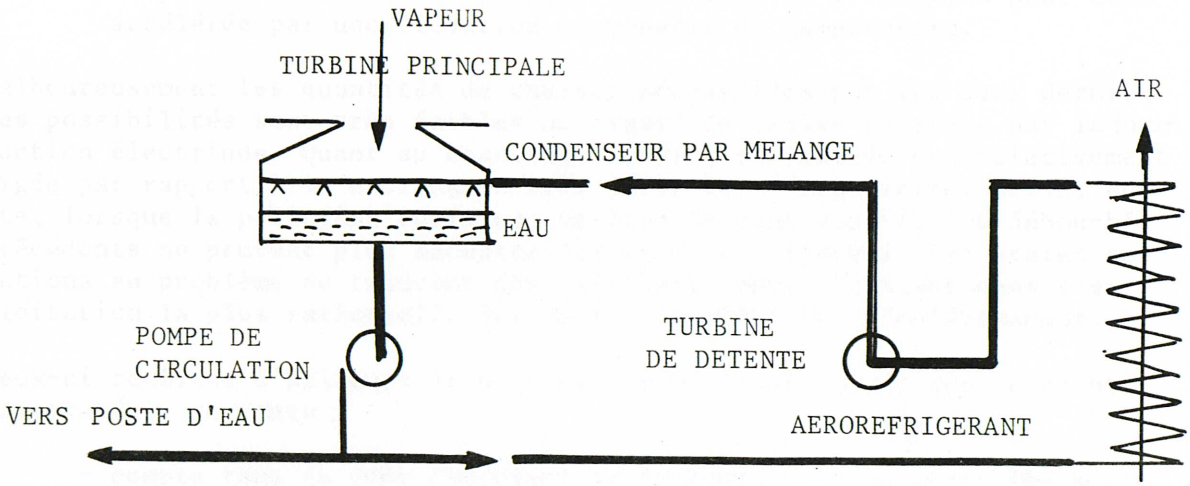
Le circuit fermé (voie humide)



L'aérocondenseur



L'aéroréfrigérant



Le tableau suivant donne l'incidence du système de refroidissement sur le coût de la centrale :

Système de refroidissement	Coût d'installation (% de l'inv. total)	Coût d'exploitation actualisé (% de l'inv. total)	Incidence sur le prix de l'électricité (% du prix du KWH)
Voie humide, circuit ouvert	5 à 6 %	1 %	3 à 4,5 %
Voie humide, circuit fermé	10 à 12 %	5 %	7 à 9,5 %
Voie sèche, aérocondenseur	20 %	9 %	11 à 16 %
Voie sèche, aéroréfrigérant	20 %	11 %	13 à 20 %

Seuls les deux premiers procédés ont été utilisés de façon courante.

On a mis parfois en avant certaines activités consommatrices de chaleur, qui pourraient utiliser les calories apportées par les eaux de refroidissement des centrales, comme :

- le chauffage urbain ; il pourrait employer ces dernières soit directement dans les circuits de chauffage central si leur température est suffisante ,soit indirectement dans le cas contraire ,par le biais de

pompes à chaleur situées dans les immeubles desservis : les calories retirées à la source froide (eaux de rejet des centrales) seraient transférées à la source chaude (le circuit de chauffage central de l'immeuble),

- le chauffage de serres maraîchères par ruissellement de l'eau sur les surfaces vitrées,

- la pisciculture et l'ostréiculture, dont la production peut être accélérée par une élévation convenable de température.

Malheureusement les quantités de chaleur nécessitées par les deux dernières possibilités sont très faibles au regard de celles rejetées par la production électrique. Quant au chauffage urbain, sa demande est relativement figée par rapport à la croissance très forte de l'électricité. Enfin, en été, lorsque la pollution thermique se fait le plus sentir, les débouchés précédents ne peuvent plus accepter les calories rejetées. Les vraies solutions au problème se trouvent donc ailleurs, pour l'instant dans l'exploitation la plus rationnelle des quatre procédés de refroidissement.

Ceux-ci recèlent d'ailleurs de grandes possibilités, ainsi que le prouve la stratégie suivante :

- compte tenu du coût croissant de la première à la quatrième méthode, il semble logique de commencer par utiliser les deux premières partout où elles sont possibles (fleuves, lacs, côtes) en prenant pour critère d'implantation la proximité des centres utilisateurs,

- pour les installations ultérieures, il est possible d'imaginer des îlots artificiels en pleine mer, regroupant plusieurs centrales pour bénéficier des capacités de refroidissement énormes des océans ; en plus du coût élevé d'implantation, il faut tenir compte du transport par câbles sous-marins pour faire l'arbitrage entre cette solution et les deux dernières méthodes,

- les pays sans accès à la mer seront peut-être contraints de faire produire leur électricité par les autres.

En définitive, même sans le secours d'une nouvelle technique de production non thermiquement polluante, les perspectives présentes ne paraissent pas imposer une limitation à la croissance de la consommation d'énergie électrique.

C O N C L U S I O N

Notre conclusion sera très modeste. Il nous semble que, devant le fait pollution, deux écueils doivent être évités. A la lumière des faits que nous venons d'exposer, on ne peut évidemment pas agir comme si les dangers qu'elle engendre n'existaient pas, sans mettre en cause les cycles écologiques qui prédominent actuellement. A l'inverse, peser par trop toutes les conséquences, même infimes, qui peuvent résulter sur l'environnement des actes de l'humanité, ne manquerait pas de tuer le dynamisme dont l'homme, pour des raisons qui sortent de notre propos, doit faire preuve.

Il s'agit de prendre la mesure du risque encouru, avant de le tenter, quand cela le vaudra, ou avant de l'écarter en cas de danger important, ce qui nécessite une analyse de sang-froid. Malheureusement la matière ne s'y prête ni par son contenu presque passionnel, ni par les appétits qu'elle suscite. Le caractère sensationnel qui depuis quelques années s'attache à la pollution, n'a fait que renforcer cette tendance, par le regroupement qu'il provoque dans les opinions autour des deux positions extrêmes, et par les assauts de mauvaise foi qu'entraîne directement ce clivage.

Le fléau semble s'incliner beaucoup moins du côté de la pollution atmosphérique que de celle des eaux, lorsqu'il faut peser les risques respectifs que font courir des deux catégories de nuisances. En effet, d'une part, le sol joue le rôle d'un filtre chimique et mécanique vis-à-vis des polluants, et présente en général un pouvoir tampon non négligeable; d'autre part, l'écosystème aquatique favorise considérablement plus que son homologue terrestre, les phénomènes de concentration. Enfin, la mauvaise connaissance que nous avons encore des processus biologiques marins, achève de justifier les privilèges dont la recherche doit profiter en ce domaine.

La nécessité d'effectuer des recherches approfondies constitue d'ailleurs le plus souvent la conclusion d'une étude sur la pollution et ses problèmes. Elle s'exprime par une faillite des modèles mathématiques, qui ne peuvent apporter plus que les hypothèses qu'on leur a données initialement, et qui traduisent une réalité encore mal comprise.